

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Deividas NAVIKAS

GELEŽINKELIO KELIO BALASTO IR
POBALASTINIO SLUOKSNIŲ
STRUKTŪROS IR SAVYBIŲ KAITOS
MODELIAVIMAS, ĮVERTINANT APLINKOS
ORO VEIKSNIUS IR TRAUKINIŲ EISMO
APKROVAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
TRANSPORTO INŽINERIJA (03T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2018

Disertacija rengta 2013–2018 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. habil. dr. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Marijonas BOGDEVICIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Nariai:

prof. dr. Žilvinas BAZARAS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – 03T),

prof. dr. Gintautas BUREIKA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T),

doc. dr. Šarūnas MIKALIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T),

prof. dr. Juris SMIRNOVS (Rygos technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2018 m. birželio 7 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2018 m. gegužės 4 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva), Klaipėdos universiteto (K. Donelaičio g. 3, LT-92144 Klaipėda, Lietuva), Aleksandro Stulginskio universiteto (Studentų g. 11, LT-53361 Akademija, Kauno r., Lietuva), Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, LT-44239 Kaunas, Lietuva) bibliotekose.

VGTU leidyklos TECHNIKA 2018-020-M mokslo literatūros knyga

<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-107-2

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2018

© Deividas Navikas, 2018

deividas.navikas@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Deividas NAVIKAS

**MODELLING OF RAILWAY BALLAST AND
SUB-BALLAST LAYERS STRUCTURE AND
PROPERTIES CONSIDERING AMBIENT AIR
FACTORS AND TRAIN TRAFFIC LOAD**

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
TRANSPORT ENGINEERING (03T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2018

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2013–2018.

Supervisor

Prof. Dr Habil. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Transport Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Habil. Marijonas BOGDEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T).

Members:

Prof. Dr Žilvinas BAZARAS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – 03T),

Prof. Dr Gintautas BUREIKA (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T),

Assoc. Prof. Dr Šarūnas MIKALIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T),

Prof. Dr Juris SMIRNOVS (Riga Technical University, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Transport Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p. m. on 7 June 2018**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 4 May 2018. A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt>, at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania), at the Library of Klaipėda University (K. Donelaičio st. 3, LT-92144 Klaipėda, Lithuania), at the Library of Aleksandras Stulginskis University (Studentų st. 11, LT-53361 Akademija, Kaunas r., Lithuania) and at the library of Kaunas University of Technology (K. Donelaičio st. 20, LT-44239 Kaunas, Lithuania).

Reziumė

Disertacijos darbo aktualumas yra susijęs su sistemos „riedmuo–kelias“ esamų skaitinių modelių ir projektavimo normų tobulinimu. Rengiant darbą buvo kompleksškai ištirtos geležinkelio kelio konstrukcijai įrengti naudojamų mineralinių medžiagų fizinės ir mechaninės savybės. Kiekybiškai įvertinta technologinių procesų įtaka šių savybių kaitai. Nustatytos atskirų geležinkelio kelio konstrukcijos sluoksnių savybės veikiant didžiausiai riedmenų ašies apkrovai ir skirtingai aplinkos oro temperatūrai bei drėgmei. Šiam tikslui pasiekti išanalizuoti mokslo darbai, atliktas skaitinis modeliavimas ir eksperimentiniai tyrimai.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai, santrauka anglų kalba ir 7 priedai.

Įvadiniam skyriuje pateikta tiriamoji problema, darbo aktualumas ir tyrimų objektas. Formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos.

Pirmajame skyriuje išanalizuoti mokslo darbai, susieti su geležinkelio kelio konstrukcijai įrengti naudojamų medžiagų savybėmis ir jų įtaka geležinkelio kelio konstrukcijos eksploataciniams rodikliams. Nagrinėjami sistemos „riedmuo–kelias“ modeliai ir destruktiviųjų veiksnių įtaka geležinkelio kelio konstrukcijos eksploataciniams rodikliams. Aptariami naudojami būdai ir priemonės, skirti išlaikyti ir atstatyti geležinkelio kelio konstrukcijos eksploatacinius rodiklius.

Antrajame skyriuje pateikiamas aplinkos oro veiksnių įtakos geležinkelio kelio konstrukcijos elgsenai nustatymo ir vertinimo metodas. Sudaryti geležinkelio kelio konstrukcijos hidroterminio režimo ir riedmenų apkrovų įtakos geležinkelio kelio konstrukcijai skaitiniai modeliai.

Trečiajame skyriuje pateikiami eksperimentinių tyrimų, kurių metu buvo ištirtos geležinkelio kelio konstrukcijai įrengti naudojamų mineralinių medžiagų fizinės ir mechaninės savybės, rezultatai. Šiame skyriuje pateikiami geležinkelio kelio konstrukcijose vykstančių fizikinių procesų ir geležinkelio kelio deformacijų rezultatai. Sukurti skaitiniai modeliai ir iš jų gauti rezultatai leidžia patobulinti jau esamus skaitinius modelius ir patikslinti geležinkelio kelio projektavimo metodiką, kurioje įvertinta daugiau destruktiviųjų veiksnių.

Disertacijos tema paskelbti 4 straipsniai: vienas – mokslo žurnale, įtrauktame į *Thomson Reuters Web of Science* duomenų bazę ir turinčiame citavimo rodiklį, du – mokslo žurnaluose, referuojamuose kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose, vienas – tarptautinės konferencijos leidinyje, referuojamame *Thomson Reuters* duomenų bazėje *Proceedings*.

Abstract

The relevance of the dissertation relates to the improvement of the existing numerical models and design norms of the “car–track” system. Comprehensive analysis of physical and mechanical properties of mineral materials used to install railway track construction was carried out in the course of the thesis, also performing a quantitative assessment of the impact of technological processes on the change of these properties. Properties of different railway track construction layers exposed to the maximum rolling stock axle load, different ambient air temperatures and moisture were determined. Analysis of scientific works, numerical modelling and experimental research were carried out for this purpose.

The dissertation consists of the introduction, three chapters, general conclusions, references, a list of publications by the author on the topic of the dissertation, summary in English and 7 annexes.

The introduction presents the research problem, the relevance of the thesis and the object of the research. The objective and tasks of the thesis are formulated, describing the research methodology, the scientific novelty of the thesis, the practical significance of the results of the thesis and the defence statements. Author publications on the topic of the dissertation are listed at the end of the introduction.

The first chapter analyses research works related with the properties and technologies used to instal the railway track construction and their influence on the performance indicators of the construction. The “car–track” system models and the impact of destructive factors on the performance indicators of the railway track construction are analysed. The methods and means used to maintain and restore the performance indicators of the railway track construction are discussed.

The second chapter presents the identification of the ambient air factors and their assessment. Numerical models for determining the hydrothermal mode of the railway track construction and rolling stock loads affecting the railway track construction are compiled.

The third chapter presents result of the experimental research carried out to investigate the physical and mechanical properties of materials used to install the railway track construction. This chapter presents the results of physical processes that occur in the railway track constructions and its deformation results. The created numerical models and the results received in application there of allow improving the existing numerical models and revising design methodologies including increasingly more destructive factors.

4 articles were published on the topic of the dissertation: one – in the scientific journal included in the *Thomson Reuters Web of Science* database with a citation index, two – in scientific journals refereed in publications of other international databases and one – in international conference journal assessed by *Thomson Reuters* database *Proceedings*.

Žymėjimai

Simboliai

a, b, c – atitinkamai nežinomieji modelio parametrai (koeficientai), nulemiantys kreivės formą ir asimetriją;

B – Bartleto kriterijus;

C – specifinė šilumos talpa, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

C_c – sanklodos rodiklis;

C_u – vienodumo koeficientas;

DEN_p – tankis, Mg/m^3 ;

d_s – reikalingo papildomo sluoksnio storis, m;

d_{sg} – pobalastinio sluoksnio storis, m;

d_{10} – didžiausias dalelių skersmuo, kurie granulimetrinės sudėties kreivės ordinatėje atitinka iki 10 %, tiriamojo MMM masės dalis, mm;

d_{30} – didžiausias dalelių skersmuo, kurie granulimetrinės sudėties kreivės ordinatėje atitinka iki 30 %, tiriamojo MMM masės dalis, mm;

d_{60} – didžiausias dalelių skersmuo, kurie granulimetrinės sudėties kreivės ordinatėje atitinka iki 60 %, tiriamojo MMM masės dalis, mm;

d_α – Kolmogorov-Smirnov atitikimo normaliajam skirstiniui kritinė reikšmė;

E – tampros modulis, GPa;

E_{BS} – balasto sluoksnio tampros modulis, GPa;

E_G – granito tampros modulis, GPa;

E_L – ledo/vandens tampros modulis, GPa;

E_{MMM} – mineralinių medžiagų mišinio tampros modulis, GPa;

E_{NGS} – natūralaus grunto sluoksnio tampros modulis, GPa;

E_O – oro tampros modulis, GPa;
 E_{O+V} – oro ir vandens tampros modulis, GPa;
 E_{PBS} – pobalastinio sluoksnio tampros modulis, GPa;
 E_{PSM} – priemolių ir priesmėlių mišinio tampros modulis, GPa;
 E_{SS} – sankasos sluoksnio tampros modulis, GPa;
 $E_{SŽ}$ – smėlio ir žvyro mišinio tampros modulis, GPa;
 E_{vd} – dinaminis deformacijos modulis, MN/m²;
 E_{v2} – statinis deformacijos modulis, MN/m²;
 FLI – šiurkštumo koeficientas, %;
 $F(t)$ – jėga, N;
 h_{pr} – 0 °C atstumas vertikaloje nuo paviršiaus GKK, m;
 h_{pv} – gruntinio vandens lygis, m;
 h_s – kapiliarinio vandens išleidimo kanalų ilgis, m;
 I_F – šalčio rodiklis, °C·dienos;
 K – standumo koeficientas, N/m;
 k – kintamųjų skaičius;
 k_i – laisvės laipsnių skaičius;
 LA_{RB} – atsparumo trupinimui rodiklis (Los Andželo koeficientas), %;
 L_f – energijos tankis, reikalingos ledui paversti vandeniu, J/m³;
 L_v – energijos tankis, reikalingos vandeniui paversti garais, J/m³;
 l – ištirtų imčių t. y. ėminių ėmimo vietų skaičius;
 M_{DE} – atsparumo dėvėjimuisi rodiklis (mikro-Devalio koeficientas), %;
 N – bandinių skaičius;
 n – mažiausias būtinas duomenų skaičius;
 n_i – i-osios ėminių ėmimo vietos ištirtų ėminių skaičius;
 n_j – j-ojo kintamojo stebėjimų skaičius;
 \bar{p} – pilnutinių išbirų aritmetinių vidurkių, %;
 R^2 – determinacijos koeficientas;
 r_j^2 – j-osios imties rangų sumos kvadratas;
 SI – formos rodiklis;
 SZ_{RB} – atsparumo smūgiams rodiklis, %;
 s_i^2 – i-os ėminių ėmimo vietos procentinių išbyrų per laboratorinius sietus paslinkta dispersija;
 \bar{s}^2 – iš visų ėmimo vietų paimtų ėminių imčių svertinis dispersijų vidurkis;
 s_{sk} – asimetrijos koeficiento (skewness) atitikimo normaliajam skirstiniui kritinė reikšmė;

s_{ku} – eksceso koeficiento (kurtosis) atitikimo normaliajam skirstiniui kritinė reikšmė;
 s_p – standartinis nuokrypis, %;
 s_{pmax} – didžiausias standartinis nuokrypis, %;
 T_p – vidutinė paros temperatūra, °C;
 $T(x,t)$ – temperatūra taške x laiko momentu t , K;
 T_7 – temperatūra, išmatuota 7:00 2 m atstumu nuo žemės paviršiaus, °C;
 T_{14} – temperatūra, išmatuota 14:00 2 m atstumu nuo žemės paviršiaus, °C;
 T_{21} – temperatūra, išmatuota 7:00 2 m atstumu nuo žemės paviršiaus, °C;
 t – laiko intervalas, s;
 t_f – pradinis laikas, kai paros vidutinė paros temperatūra (T_s) tapo neigiama, diena;
 t_s – galutinis laikas, kai paros vidutinė temperatūra (T_s) dar buvo neigiama, diena;
 Δt_c – temperatūros pokytis, °C;
 U – netolygumo koeficientas;
 z – vertikalus poslinkis, mm;
 $z_{a/2}$ – pasirenkamas patikimumo laipsnis (arba tikimybė gauti teisingą atsakymą);
 W_{24} – vandens įmirkis, %;
 w_c – Shapiro – Wilk atitikimo normaliajam skirstiniui kritinė reikšmė;
 q_a – ašies apkrova, kN;
 $q(t,x)$ – šilumos – srauto tankis taške x laiko momentu t , ($W \cdot m^{-2}$);
 \bar{X} – kokybės rodiklio aritmetinis vidurkis;
 x – aplinkos oro temperatūra, °C;
 α – reikšmingumo lygmuo;
 λ – šilumos laidumo koeficientas, ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$),
 λ_s – papildomo pobalastinio sluoksnio storio specifinis šilumos laidumo koeficientas, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$;
 λ_{sg} – esamo pobalastinio sluoksnio storio specifinis šilumos laidumo koeficientas, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$;
 δ – leidžiama santykinė paklaida, %;
 ρ – tankis, kg/m^3 ;
 V – variacijos koeficientas, %;
 σ – matavimų bendras standartinis nuokrypis;
 Δ – leistinoji paklaida tarp apskaičiuoto aritmetinio vidurkio ir tikrojo vidurkio;
 χ^2 – chi-square (Pearson) atitikimo normaliajam skirstiniui kritinė reikšmė.

Santrumpos

ANN – dirbtinis neuroninis tinklas (angl. *artificial neural network*);
AOT – aplinkos oro temperatūra;
ASS – apsauginis sankasos sluoksnis;
BCSL – trupėjimo kritinė vertė (angl. *breakage critical-state line*);
BEM – baigtinių elementų metodas;
BS – balasto sluoksnis;
BVP – bendrasis vidaus produktas;
DEM – diskrečiųjų elementų metodas;
GKK – geležinkelio kelio konstrukcija;
GVL – grunto vandens lygis;
KG1 – mažesnio pralaidumo vandeniui mineralinių medžiagų mišinys (vok. *kornge-misch 1*);
KG2 – didesnio pralaidumo vandeniui mineralinių medžiagų mišinys (vok. *kornge-misch 2*);
KKI – kelio kokybės indeksas (angl. *track quality index*);
KMA – karšto maišymo asfaltas;
KOSIS – kelių oro sąlygų informacinė sistema (angl. *road weather information system*);
KS – Kolmogorov-Smirnov;
KURT – eksceso koeficientas (angl. *kurtosis*);
KV – Kruskal Wallis;
MBS – mažiausias būtinasis ėminių skaičius;
MMM – mineralinių medžiagų mišinys;
PBS – pobalastinis sluoksnis;
SK – sandėliavimo krūva;
SKEW – asimetrijos koeficientas (angl. *skewness*);
SRG – Slovakijos Respublikos geležinkeliai (slovak. *Železnice Slovenskej Republiky*);
SW – Shapiro-Wilk;
ŠR – šalčio rodiklis (angl. *frost index*);
TDA – susmulkintų padangų užpildas (angl. *tyre-derived aggregate*);
TJ – transporterio juosta;
V – transportuojantis vagonas.

Sąvokos

Aplinkos oro veiksniai (angl. *ambient air factors*) – meteorologinių reiškinių visumą sudarantys atskiri veiksniai, išsilaikantys tam tikrą laiko tarpą, skirtingai nei klimato veiksniai, reiškiantys vidutinius ilgo laikotarpio aplinkos orų dydžius.

Balasto sluoksnis (prizmė) (angl. *ballast prism*) – nustatytos formos ir dydžio balasto sankasa pabėgiams atremti, užtikrinanti reikiamą geležinkelio kelio stiprumą, normalų naudojimą ir ilgalaikiškumą.

Balasto plūkimas (angl. *ballast stabilization, tamping*) – mechaninis balasto prizmės tuštumų mažinimas ir sluoksnio tankinimas plūkiant ar vibruojant specialiomis mašinomis.

Balasto užterštumas (angl. *ballast contamination, ballast pollution*) – rodiklis, matuojamas teršalų kiekiu (procentais) nuo bendros balasto prizmės masės arba teršalų tūrio ir tuštymų tūrio santykiu.

Bandinys (angl. *test sample*) – ėminio dalis, kuri sunaudojama vienam bandiniui.

Bitumas (angl. *bitumen*) – gamtinis arba dirbtinis sočiųjų angliavandenilių mišinys, dažniausia kietas, plastiškas arba klampus.

Daugiakelis geležinkelis (angl. *multipath railway*) – geležinkelis, kurį tarpstočiuose sudaro daugiau kaip du pagrindiniai keliai.

Deformacija (angl. *deformation*) – kūno formos arba tūrio kitimas.

Degradacija (angl. *degradation*) – savybių laipsniškas mažėjimas, blogėjimas.

Dolomitas (angl. *dolomite*) – nuosėdinės, rečiau hidroterminės kilmės karbonatinė uoliena, sudaryta iš dolomito mineralo kristalų su nedidele (iki 25 %) kitų mineralų – kalcito, rečiau gipso, molio mineralų ir geležies oksidų – priemaiša.

Dūlėjimas (angl. *weathering*) – geologinis procesas, kurio metu yra uolienos, gruntai ar mineralai veikiami fizinių, cheminių ar biologinių veiksmų.

Efektyvumas (angl. *efficiency*) – Išteklų panaudojimo veiksmingumas, kai norimas rezultatas pasiekiamas mažiausiomis įmanomomis sąnaudomis arba naudojant turimus išteklius pasiekiamas didžiausias įmanomas rezultatas.

Ėminys (angl. *test subsample*) – iš generalinės aibės (tiriamosios visumos) tyrimui paimtas objektas ar medžiagos porcija.

Fizikinis procesas (angl. *physical process*) – procesas, kurio metu medžiagos nevirsta kitomis, o kinta tik jų fizikiniai parametrai (agregatinė būseną, kietumas, klampumas, tankis, elektrinis ir šiluminis laidumas ir kt.).

Geležinkelio balastas (angl. *railway ballast*) – tiesiamam geležinkelio keliui naudojama mineralinė medžiaga, kurios dalelių 100 % paviršiaus gali būti apibūdintas kaip visiškai skeltas.

Geležinkelio balasto skaldos stambumas (angl. *size of the railway ballast crushed stone*) – geležinkelio balasto dalelių dydis, apibotas apatinio (d) ir viršutinio (D) sietų akučių dydžiu. Tokiame apibrėžime pripažįstama, kad jame gali būti tam tikro kiekio dalelių, kurios užsilaikys ant viršutinio sieto (per stambi frakcija) ir tam tikro kiekio dalelių, kurios praeis pro apatinį sietą (per smulki frakcija).

Geležinkelio kelias (angl. *railway track*) – inžinerinis statinys, kurį sudaro žemės sankasa, viršutinė kelio konstrukcija (balasto sluoksnis, pabėgiai, bėgiai) ir kiti inžineriniai įrenginiai, reikalingi traukinių eismui.

Geležinkelio kelio viršutinė konstrukcija (angl. *railway superstructure*) – virš sankasos esanti konstrukcijos dalis, kurios paskirtis yra išlaikyti riedmenis ir pasikirstyti apatines konstrukcijas veikiančias apkrovas. Viršutinę kelio konstrukciją sudaro: bėgiai, pabėgiai, balastas, sąvaržos, priešštūmiai, iešmai, tiltiniai ir iešmo pabėgiai.

Geležinkelio riedmenys (angl. *rolling stock*) – geležinkelių transporto priemonės, judančios geležinkelio keliais, naudojančios trauką arba jos nenaudojančios, traukiamos kitų geležinkelio riedmenų ar traukiančios kitus geležinkelio riedmenis (lokomotyvai, vagonai ir kita).

Geležinkelių apkrova (angl. *loading of railways*) – tai kelio naudojimo rodiklis, skaičiuojamas dalijant krovinių apyvertą (tonkilometrus) iš geležinkelio ilgio (kilometrais).

Geležinkelių transportas (angl. *railway transport*) – ūkio ir socialinės infrastruktūros dalis, skirta visuomenės ir ūkio subjektų poreikiams tenkinti – keleiviams, bagažui ir (ar) kroviniams geležinkeliais vežti.

Geotekstilė (angl. *geotextile*) – pralaidus vandeniui audinys, pagamintas iš polipropileno arba poliesterio. Naudojama grunte norint atskirti ir stiprinti jo sluoksnius, filtruoti, apsaugoti ar nusausti (drenuoti).

Geotinklas (angl. *geogrid*) – plokščia geosintetika, sudaryta iš taisyklingų ertmių, kurias riboja tempimo elementai, tinklo. Tempimo elementai, kurių plotas mažesnis negu ertmių, gali būti sujungti pradūrimo – tempimo, terminiu ir pynimo būdais.

Granitas (angl. *granite*) – magminių intrūzinių uolienų grupė. Susidaro kontinentuose veikiant dideliame slėgiui ir temperatūrai.

Granuliometrinė sudėtis (angl. *gradation*) – biriosios ar silpnai susicementavusios uolienos (grunto), dirvožemio stambumo rodiklis. Nustatomas skirtingo didumo dalelių kiekis, procentais, tų dalelių bendrojo skaičiaus arba jų masės atžvilgiu.

Ilgalaikiškumas (angl. *lifespan, durability*) – medžiagos ir/ar konstrukcijos savybė išlikti nepakitusia ilgą laiką.

Imtis (angl. *sample size*) – iš generalinės aibės tyrimui ėminių grupė.

Išdžiovintų dalelių tankis (angl. *particle density on an oven dried basis*) – krosnyje išdžiovinto užpildo ėminio dalelių masės ir tūrio, kurį jos užima vandenyje, įskaitant jose esančias uždaras ir atviras poras, dalmuo.

Išjudintas balastas (angl. *moved ballast*) – terminas apibūdinantis balastą, kuriame dėl kelio ištaisymo darbų technologinių procesų išnyksta įtempiai.

Įmirkis (angl. *water absorption*) – išdžiovinto krosnyje užpildo masės padidėjimas nuo vandens įgėrio į atviras poras.

Išalo gylis (angl. *frost depth*) – vertikalus atstumas nuo žemės paviršiaus, kuriame grunto kapiliaruose esantis vanduo užšąla.

Kapitalinis remontas (angl. *major repair*) – geležinkelio kelio remontas, kuris atliekamas po 25 metų nuo kelio pastatymo arba jei vežta daugiau nei 500 mln. t bruto krovinių. Šio remonto metu keičiama visa kelio konstrukcija ir daromas sankasos remontas.

Kelio ištaisymas (angl. *track rectification*) – viršutinės kelio konstrukcijos geometrijos atstatymas į projektinę padėtį.

Kelio mašina (angl. *track machine*) – mašina viršutinei tiesiamo ir rekonstruojamo kelio konstrukcijai įrengti ar kitiems kelio taisymo ir priežiūros darbams atlikti.

Kelio patvarumas (angl. *track durability*) – savybė išlaikyti projektavimo normose nustatytus eksploatacinius reikalavimus kuo ilgesnį arba nustatytą laikotarpį.

Kietumas (angl. *hardness*) – kietos medžiagos savybė priešintis kito, už ją kietesnio, kūno įsmigimui, įspaudimui.

Klasė (angl. *category*) – mineralinės medžiagos savybės lygis, išreikštas verčių intervalu arba ribine verte.

Klimatiniai veiksniai (angl. *climatic factors*) – apibrėžtame regione vyraujančių vidutinių daugiamečių (apytikriai 30 metų) meteorologinių reiškinių ir rodiklių visuma.

Kohezija (angl. *cohesion*) – medžiagos dalelių (molekulių, atomų ar jonų) sukibimas dėl molekulių sąveikos ar cheminio ryšio jėgų.

Matematinis modelis (angl. *mathematic model*) – fizinė sistema aprašyta matematine kalba, visi darbe pateikti matematiniai modeliai yra netiesinės dinamikos uždaviniai.

Mineralinė medžiaga (angl. *mineral aggregate*) – grūdelių pavidalo medžiaga, naudojama statyboje. Mineralinė medžiaga gali būti gamtinė (natūrali), dirbtinė arba antrinio perdirbimo.

Mineralinės dulkės (angl. *finer*) – balasto dalelės, praeinančios pro 0,063 mm akučių dydžio sieta.

Nusėdimas (angl. *settlement*) – balasto ir kartu visos viršutinės konstrukcijos nusileidimas vertikaloje, kurį lemia dėl apkrovų tankėjantis ir degraduojantis balastas.

Pabėgiai (angl. *sleepers*) – skersiniai kelio komponentai, kurie nustato vėžės plotį ir perduodantys apkrovas nuo bėgio balastui arba kitai pabėgio atramai.

Pamušimas (angl. *tamping*) – tai kelio pakėlimas ir skersinis pastūmimas (richtavimas) į reikiamą padėtį, tuo metu perstumiant balastą viršutinėje jo dalyje tam, kad neliktų tuštumų po pabėgiais ar tarp jų.

Pobalastinis sluoksnis (angl. *sub-ballast layer*) – apatinis balasto prizmės sluoksnis, neleidžiantis sankasos gruntams patekti ir užteršti aukščiau esantį skaldos sluoksnį.

Poslinkis (angl. *displacement*) – atstumas tarp pradinio ir galinio judėjimo taškų.

Sąvarža (angl. *fastening*) – bėgio tvirtinimo prie bėgių pagrindo (pabėgių) arba jungimo su kitu bėgiu įtaisas.

Smulkiosios dalelės (angl. *fine particles*) – geležinkelio balasto dalelės, praeinančios pro 0,5 mm akučių dydžio sietą.

Technologinis procesas (angl. *technological process*) – nuosekliai atliekamų technologinių operacijų eilė.

Tuštymėtumas (angl. *air voids*) – rodiklis, parodantis kurią tūrio dalį piltinėje medžiagoje užima tuštymės, priklauso nuo dalelių formos, granulimetrinės sudėties, drėgnumo, sutankinimo laipsnio ir kt.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika.....	4
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	6
Padėka	6
1. GELEŽINKELIO KELIO KONSTRUKCIJOS SLUOKSNIŲ TYRIMŲ PASAULINĖS PATIRTIES ANALIZĖ	7
1.1. Geležinkelio infrastruktūros reikšmė transportavimo procesui ir jos reikiamos savybės	8
1.2. Geležinkelio kelio įrengimo technologijų analizė	10
1.2.1. Pobalastiniam sluoksniui įrengti naudojamos medžiagos ir technologijos...	11
1.2.2. Balasto sluoksniui įrengti naudojamos medžiagos ir technologijos	14
1.3. Geležinkelio kelio deformacijas ir irtis sukeliantys traukinių eismo ir aplinkos veiksniai.....	18

1.4. Aplinkos veiksniai	23
1.5. Šalčio poveikio ir grunto įšalo žemėlapiai	25
1.6. Geležinkelio kelio deformacijos modeliai	29
1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	39
2. BALASTO IR POBALASTINIO SLUOKSNIŲ SAVYBIŲ NUSTATYMAS, HIDROTERMINIO REŽIMO IR VERTIKALIŲJŲ DEFORMACIJŲ MODELIAVIMAS	41
2.1. Biriųjų medžiagų savybių ir statistinių parametų nustatymo metodai	42
2.2. Klimatinių sąlygų nustatymas ir vertinimas	50
2.3. Važiuojančio traukinio sukeliamų geležinkelio kelio konstrukcijos deformacijų modeliavimas.....	58
2.4. Geležinkelio kelio konstrukcijos sluoksnių tampros moduliai	62
2.5. Antrojo skyriaus išvados	65
3. GELEŽINKELIO KELIO KONSTRUKCIJOS MEDŽIAGŲ IR SLUOKSNIŲ EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	67
3.1. Pobalastinio sluoksnio mineralinio medžiagų mišinio savybių statistinis tyrimas	68
3.2. Balasto skaldos savybių kaitos technologinio proceso metu statistinis tyrimas	77
3.3. Geležinkelio kelio konstrukcijos savybių skaitinis modeliavimas	90
3.4. Lietuvos geležinkelio kelių geometrijos parametų dinamika	96
3.5. Trečiojo skyriaus išvados	101
BENDROSIOS IŠVADOS	103
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	105
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	123
SUMMARY IN ENGLISH.....	125
PRIEDAI¹	141
A priedas. Balasto skaldos, geotekstilės ir geotinklo pagrindiniai rodikliai ir jų nustatymo standartinius metodus reglamentuojantys standartai	143
B priedas. Balasto sluoksnio ėminių, paimtų iš skirtingų technologinio proceso vietų, atitikimas normaliojo skirstinio reikalavimams.....	145
C priedas. Temperatūrų pasiskirstymai skirtingose skersinių profilių GKK, veikiant Lietuvos AOT	148
D priedas. Būtinasis mažiausias ėminių skaičius, granito skaldos savybėms nustatyti	153
E priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija	154
F priedas. Bendra autorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje.....	155
G priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	157

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem.....	1
Relevance of the thesis	2
The object of research	3
The aim of the thesis	3
The tasks of the thesis	3
The research methodology	4
Scientific novelty of the thesis	4
Practical value of the research findings.....	4
Defended statments	5
Approval of the research findings	5
The structure of the dissertation	6
Acknowledgment	6
1. ANALYSIS OF WORLDWIDE EXERIENCE OF RAILWAY TRACK CONSTRUCTIONS LAYERS RESEARCH	7
1.1. The significance of the railway infrastructure for the transportation process and its required characterisites.....	8
1.2. Construction technology of railway track	10
1.2.1. Materials and technologies of sub-ballast layer construction	11
1.2.2. Materials and technologies of ballast layer construction	14
1.3. Train traffic and environmental factors affecting railway track deformation....	18

1.4. The environmental factors.....	23
1.5. Frost impact and frost depth maps.....	25
1.6. Deformation models of railway track.....	29
1.7. Conclusions of the 1st chapter and formulation of the tasks of the thesis	39
2. DETERMINATION OF BALLAST AND SUB-BALLAST LAYERS PROPERTIES AND MODELLING OF HYDROTHERMAL AND VERTICAL DEFORMATIONS.....	41
2.1. Methods for determining the properties and statistical parameters of materials	42
2.2. Determinations and evaluation of climate parameters.....	50
2.3. Modelling of deformations of railway track constructions caused by train movement	58
2.4. Elasticity modules of railway track construction layers	62
2.5. Conclusions of the 2nd chapter	65
3. EXPERIMENTAL RESEARCH OF RAILWAY TRACK CONSTRUCTION MATERIALS AND LAYERS.....	67
3.1. Mineral aggregate mixture of sub-ballast layer statistical analysis	68
3.2. Crushed aggregate of ballast layer statistical analysis during technological process	77
3.3. Experimental research of railway track construction properties.....	90
3.4. Dynamics of Lithuanian railway track geometry	96
3.5. Conclusions of the 3 rd chapter	101
GENERAL CONCLUSIONS	103
REFERENCES	105
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	125
ANNEXES²	141
Annex A. Main parameters and regulating standards of laboratory methods of crushed aggregate for ballast, geotextile and geogrid Got results taken from different technological processes places compliance to normal distribution .	143
Annex B. Got results taken from different places of technological processes of ballast layer, compliance to normal distribution	145
Annex C. Temperature distributions in different cross-sections of railway track constructions under Lithuanian ambient air temperatures	148
Annex D. Compulsory minimal number of samples to identify properties of crushed granite.....	153
Annex E. Declaration of academic integrity	154
Annex F. Agreements of co-authors to provide published materials in the thesis	155
Annex G. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation.....	157

²The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Ivadas

Problemos formulavimas

Lyginant su kitomis šalimis, Lietuvos geležinkelio kelių tinklas nėra plačiai išplėtotas. Siekiant, kad esami geležinkelio keliai sklandžiai funkcionuotų ir sudarytų bendrą geležinkelio kelių tinklą su Europos ir kaimyninėmis šalimis, juos būtina tausoti, tinkamai prižiūrėti ir tobulinti. Naujai tiesiami geležinkelių keliai, kurie pasižymi didesniais leistinais greičiais ir priimamomis apkrovomis, turi funkcionuoti kuo ilgiau. Riedmenų sukuriamų apkrovų tolygus paskirstymas į geležinkelio kelio konstrukciją (GKK), GKK stipris ir ilgalaikiškumas, veikiant aplinkos oro veiksniams yra pagrindiniai naujai įrengtos GKK siektini rodikliai.

Kitų valstybių geležinkelio kelių projektavimo ir eksploatavimo patirtis rodo, kad traukinių greičiai ir kelių konstrukcijų ilgalaikiškumas bei stipris galėtų būti didesni. Keičiantis metų laikams, didėjant geležinkelio kelių konstrukcijos taršai ir kelių apkrovai, GKK balastinio (BS) ir pobalastinio (PBS) sluoksnių funkcionalumas prastėja, todėl sumažėja riedmenų greitis, kelių pralaidumas, eismo saugumas ir reikalinga dažnesnė jų priežiūra.

Norint pailginti geležinkelio kelių eksploatacinį laikotarpį, riedmenų tarnavimo laiką ir didinti eismo saugumą, reikia tobulinti esamus sistemos „riedmuo–kelias“ modelius, tikslinti GKK ir riedmenų sąveikos procesų rodiklius, spręsti šių

elementų suderinamumo uždavinius, kontroliuoti ir prognozuoti jų būsenas eksploatacijos metu.

Skaitiniuose modeliuose imant GKK įrengti naudojamų medžiagų fizines ir mechanines savybes bei realius GKK sluoksniuose besikeičiančios temperatūros ir drėgmės išmatuotus duomenis, kintančią aplinkos oro temperatūrą (AOT) ir sniego storį galima tiksliau įvertinti GKK vykstančių fizikinių procesų vyksmą. Naudojant sistemos „riedmuo–kelias“ skaitiniuose modeliuose GKK sluoksniuose esančio vandens, oro ir jiems įrengti naudojamos medžiagos kiekius ir temperatūrinį rodiklį, galima gauti poslinkių ir standumo koeficientų priklausomybes nuo AOT, leidžiančias tiksliau įvertinti GKK eksploatacines savybes.

Darbo aktualumas

Geležinkelio kelių ilgalaikiškumo užtikrinimas vienas iš svarbiausių geležinkelio kelio rodiklių, nuo kurio priklauso keleivių ir krovinių saugumas, išlaidos geležinkelio kelių remonto darbams ir ekonominė nauda, gaunama iš vežimų. Geležinkelio kelio ilgalaikiškumą trumpinantys veiksniai: didėjantis krovinių ir keleivinių traukinių skaičius; leistinos ašies apkrovos didinimas; per dideli greičiai kreivėse ir nuolydžiuose; aplinkos veiksniai (temperatūra, vanduo ir teršalai).

Mineralinių medžiagų, skirtų BS ir PBS, savybių tinkamumas ir homogeniškumas nėra pakankamai užtikrinamas gamybos, transportavimo, sandėliavimo ir klojimo technologinių procesų etapais. Šiame darbe tyrinėjama BS ir PBS naudojamų medžiagų fizinės ir mechaninės savybės, jų kaita ir kiti veiksniai.

Esamų kelių kokybė tikrinama matuojant vėžės pločio ir kitų šešių geometrinių rodiklių nuokrypius ir pagal jų didumą sprendžiama apie visos kelio konstrukcijos būklę. Siekiant optimaliai panaudoti lėšas, tikslinga naudoti naujus projektavimo būdus ir parinkti racionalias medžiagų gamybos, transportavimo ir geležinkelio kelių tiesimo sąlygas. GKK naudojant tinkamas konstrukcines medžiagas, kurios užtikrina kuo geresnes geležinkelio kelių eksploatacines savybes eksploatacijos laikotarpiu, kai vyrauja kintančios traukinių eismo apkrovos ir aplinkos oro veiksniai, lemia GKK ilgalaikiškumą.

Iki šiol Lietuvoje GKK projektavimo metodikoje nevertinama AOT, drėgmės kiekis sluoksniuose, įšalo gylis, priklausantis nuo klimato šilimo tendencijų, sniego sluoksnio storis. Joje taip pat nevertinami GKK sluoksnių tampros moduliai. Kompleksiškai įvertinus riedmenų sukuriamas apkrovos ir šiuos veiksnius galima tiksliau parinkti GKK sluoksnių reikiamą storį ir mineralinių medžiagų rūšį.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – geležinkelio kelio balasto ir pobalastinis sluoksniai, veikiami riedmenų sukuriamos apkrovos ir oro sąlygų veiksmų.

Darbo tikslas

Pateikti skaitinio modeliavimo metodais ir eksperimentiniais duomenimis pagrįstą geležinkelio kelio konstrukcijos elgsenos prognozavimo metodiką, leidžiančią padidinti jos ilgalaikiškumą, kai veikia traukinių eismo apkrovos ir aplinkos oro veiksniai.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti iškelti šie uždaviniai:

1. Išanalizuoti geležinkelio kelio konstrukcijai (GKK) neigiamą įtaką turinčius veiksmus eksploatacijos metu, kurie lemia jos ilgalaikiškumą.
2. Išanalizuoti kitų mokslininkų sukurtus metodus ir skaitinius modelius, skirtus tyrinėti riedmenų apkrovų poveikį į GKK.
3. Išanalizuoti skirtingas GKK įrengti naudojamas medžiagas, jų savybes ir ištyrinėti balasto ir pobalastinio sluoksniams įrengti naudojamų medžiagų fizines ir mechanines savybes ir įvertinti jų įtaką konstrukcijos eksploatacinėms savybėms.
4. Atlikus eksperimentinius bandymus, sukurti Lietuvos Respublikos projektavimo norminiuose dokumentuose naudojamų ir naudotinių skirtingų GKK skersinių profilių virtualius modelius, leidžiančius nustatyti aplinkos oro temperatūros (AOT), sniego dangos storio ir drėgmės poveikį skirtingų konstrukcinių sluoksnių įšalo gyliui.
5. Atlikus eksperimentinius bandymus ir skaitinį modeliavimą, nustatyti skirtingų Lietuvos geležinkelio kelio deformacijas ir poslinkius kintant AOT ir veikiant didžiausiai ašies apkrovai.
6. Gautus geležinkelio kelio konstrukcijos didžiausių vertikalių standumo koeficientų rezultatus palyginti su kitų autorių tyrimų rezultatais ir sudaryti metodiką, skirtą AOT ir riedmenų apkrovų į GKK poveikiui vertinti.

Tyrimų metodika

GKK sluoksniams įrengti naudojamų medžiagų kokybės rodiklių tyrimui ir vertinimui naudojami matematinės statistikos, matematiniai analiziniai, regresinės analizės bei aplinkos oro veiksnių ir riedmenų apkrovų poveikiui į geležinkelio kelio konstrukciją įvertinti AOT, sniego dangos storio, kritulių kiekio, drėgmės ir temperatūros GKK sluoksniuose matavimo ir skaitinio modeliavimo metodai.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją gauti šie transporto inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Kompleksiškai taikant matematinės statistikos ir analizės metodus buvo išsamiau ištyrinėti ir įvertinti GKK naudojamų mineralinių medžiagų kokybės rodikliai technologinio proceso metu: nuo pagaminimo gamykloje iki panaudojimo geležinkelio kelio konstrukcijoje.
2. Sukurti GKK skersinių profilių virtualūs modeliai programinio paketo „SV HEAT“ aplinkoje, leidžiantys įvertinti šiose konstrukcijose vykstančius fizikinius procesus esant kintamoms aplinkos oro sąlygoms.
3. Sukurta tikslesnė metodika, skirta įvertinti aplinkos oro veiksnius ir patobulinti skirtingų GKK projektavimo seką, kai yra netikslūs arba nesudaryti grunto įšalo gylių žemėlapiai.
4. Nustatyta GKK standumo koeficientų priklausomybė nuo AOT, leidžianti patikslinti GKK projektavimo kompleksinius modelius ir GKK sluoksnių storių kitimą eksploatacijos metu, dėl vertikalų poslinkių.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

1. Nustatyta BS ir PBS naudojamų medžiagų fizinių ir mechaninių savybių kaita technologinių procesų skirtinguose etapuose. Granulimetrinės sudėties sklaidai vertinti naudotinas iš regresijos lygties gautas didžiausias pilnutinės išbiros per sietus standartinis nuokrypis. Šis būdas leidžia vienu skaičiumi (didžiausiu standartiniu nuokrypiu) įvertinti bet kurio biraus mišinio granulimetrinės sudėties variacijos didumą.
2. Sudaryti Lietuvos Respublikos projektavimo norminiuose dokumentuose naudojamų ir naudotinų skirtingų GKK skersinių profilių virtualūs modeliai GKK eksploatacinių rodiklių prognozei atlikti. Šie modeliai leidžia, žinant GKK sluoksnių medžiagų kokybės rodiklius ir

aplinkos oro veiksnius, parinkti racionalias konstrukcijas ir jų medžiagas taip padidinant GKK ilgalaikiškumą.

3. Galimas sukurtos metodikos ir virtualių Lietuvos Respublikos projektavimo norminiuose dokumentuose naudojamų ir naudotinių skirtingų GKK skersinių profilių modelių praktinis taikymas. Juose įvertinta didžiausio šalčio rodiklio (ŠR) per penkiasdešimt metų žiemų, neigiamų temperatūrų ir sniego dangos storio įtaka GKK įšalo gyliui.
4. Padidinus GKK ilgalaikiškumą ir faktinius tarpremontinius laikotarpius, būtų užtikrintas racionalus Lietuvos Respublikos biudžeto lėšų, skirtų geležinkelio kelių tiesybos ir remonto darbams, panaudojimas.
5. Gauti tyrimų rezultatai gali būti naudojami GKK projektavimo ir eksploatavimo rodiklių prognozės metodikų tobulinimui, įvertinant riedmenų sukuriamas apkrovas ir aplinkos oro veiksnius.

Ginamieji teiginiai

1. BS ir PBS įrengti naudojamos mineralinės medžiagos ir jų mišiniai yra nehomogeniški, o jų padėties ir sklaidos rodikliai kinta skirtingų technologinio proceso etapų metu. Savybių sklaida priklauso nuo vykstančių segregacijos procesų, kuriuos galima valdyti gamybos ir transportavimo etapuose.
2. Remiantis sudarytais GKK skersinių profilių virtualiais modeliais galima patikimai įvertinti grunto įšalo procesus kintant aplinkos oro veiksniams.
3. Kuo storesnis yra sniego sluoksnis žiemos pradžioje padengęs dar nepersalusią GKK, tuo mažesniame gylyje vėliau ji peršala.
4. GKK su didesnio storio PBS (KG1) mažina dėl riedmenų sukuriamos apkrovos atsirandančius GKK vertikalius poslinkius ir GKK įšalo gylį.
5. GKK didžiausi vertikalūs poslinkiai dėl riedmenų apkrovos atsiranda esant 0 °C temperatūrai – GKK standumo koeficientas yra mažiausias.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbtos keturios mokslinės publikacijos: vienas – mokslo žurnale, įtrauktame į *Thomson Reuters Web of Science* duomenų bazę ir turinčiame citavimo rodiklį (IF) (Navikas *et al.* 2016); vienas – tarptautinių konferencijų leidinyje, referuojamame *Thomson Reuters* duomenų bazėje *Proceedings*

(Navikas, Sivilevičius 2017^a); du – mokslo žurnaluose, referuojamuose kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose (Navikas, Sivilevičius 2015; Navikas, Sivilevičius 2017^b).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti dviejose mokslinėse konferencijose Lietuvoje:

- Tarptautinėje mokslinėje – praktinėje konferencijoje: „Technologinės inovacijos tvarios visuomenės poreikiams – 2015“, 2015 m. Vilnius (Lietuva);
- 10-oje tarptautinėje konferencijoje: „Transbaltika 2017“, 2017 m. Vilnius (Lietuva).

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, 3 skyriai ir bendrosios išvados. Pridedami 7 priedai.

Darbo apimtis yra 141 puslapis, neskaitant priedų, tekste panaudotos 23 numeruotos formulės, 67 paveikslai ir 17 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudoti 223 literatūros šaltiniai.

Padėka

Nuoširdžiai dėkoju moksliniam vadovui prof. habil. dr. Henrikui Sivilevičiui už vertingus patarimus, kantrybę ir pagalbą rengiant disertaciją, prof. habil. dr. Marijonui Bogdevičiui už vertingus patarimus, kuriant skaitinį modelį, prof. dr. Libor Išvolt ir Geležinkelių inžinerijos ir kelių vadybos katedros darbuotojams už šiltą sutikimą bei suteiktą galimybę atlikti tyrimus Žilinos universitete, dr. Matui Bullevičiui ir įmonei AB „Problematika“ už bendradarbiavimą atliekant tiriamuosius darbus.

Dėkoju VGTU Mobiliųjų mašinų ir geležinkelių transporto katedros, VTDK Automobilių transporto inžinerijos katedros kolegoms ir administracijai už pagalbą ir palaikymą, artimiesiems ir draugams už paramą, kantrybę bei supratimą doktorantūros studijų metu.

Geležinkelio kelio konstrukcijos sluoksnių tyrimų pasaulinės patirties analizė

Šiame skyriuje pateikiama literatūros apžvalga. Analizuojamos ir apibendrinamos geležinkelio kelių konstrukcinių (GKK) sluoksnių atliekamos funkcijos ir jiems keliami reikalavimai. Nagrinėjami moksliniai tyrimai apie balasto (BS) ir pobalstinio (PBS) sluoksnių degradaciją lemiančius veiksnius. Pateikiama Lietuvos grunto įšalo gylio kaita, jo stebėsenos sistema, bei Slovakijos ir Vokietijos teritorijose projektuojamų GKK žemėlapiai, įvertinantys metines ŠR vertes. Išanalizuoti pasaulyje taikomi GKK apibūdinančių rodiklių vertinimo metodai. Apžvelgti pasaulio mokslininkų atlikti GKK ir jiems įrengti panaudotų medžiagų savybių įtakos GKK eksploataciniams rodikliams. Analizuojamos technologijos ir metodai leidžiantys išvengti arba sumažinti neigiamą įtaką turinčius veiksnius GKK.

Skyriaus tematika paskelbtos keturios autoriaus publikacijos kartu su bendraautoriais (Navikas, Sivilevičius 2015; Navikas *et al.* 2016; Navikas, Sivilevičius 2017^a; Navikas, Sivilevičius 2017^b).

1.1. Geležinkelio infrastruktūros reikšmė transportavimo procesui ir jos reikiamos savybės

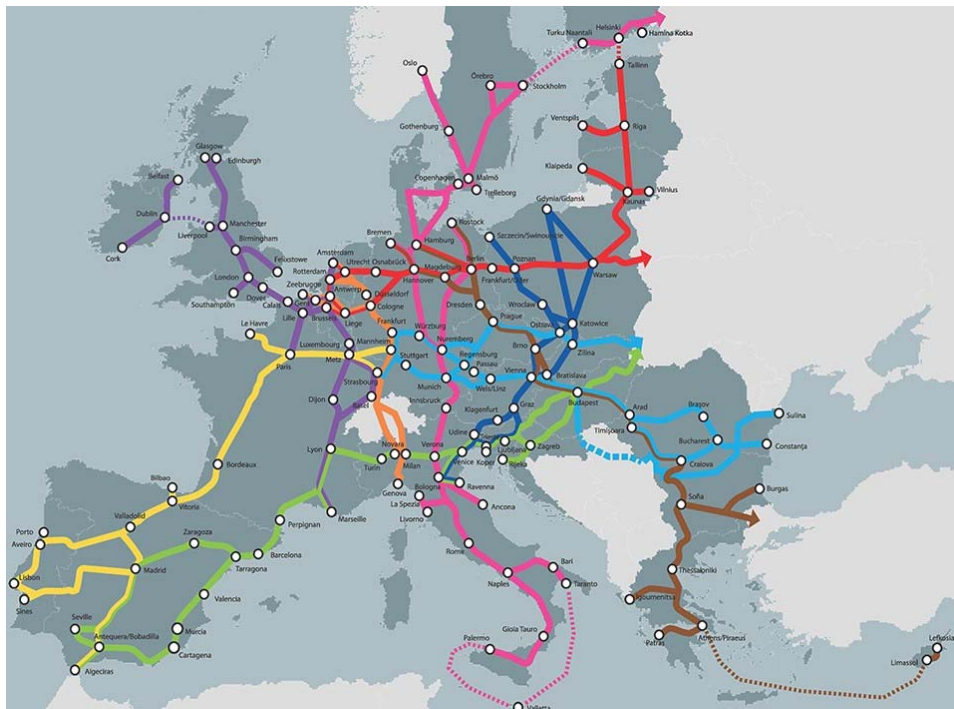
Kiekvienos rūšies transporte sąveikauja transporto priemonės, transporto infrastruktūra ir jais vežami kroviniai bei eismo dalyviai (Antonov, Smirnovs 2016). Šioje sąveikoje be siektinų (pozityvių) rezultatų (keleivių ir krovinių saugumas, kelionės laikas, geležinkelio kelio ir infrastruktūros kokybė bei ilgalaikiškumas, geležinkelių apkrova, komfortas ir ekonominiai rodikliai) yra ir negatyvūs rezultatai: eismo įvykiai ir aplinkos tarša (Podvezko, Sivilevičius 2013; Štreimikienė, Šliogerienė 2011). Geležinkelių transporte keleivių vežimo kokybė priklauso nuo kriterijų apibūdinančių riedmenų elementus ir geležinkelio kelių techninės būklės (Maskeliūnaitė, Sivilevičius 2014; Sivilevičius, Maskeliūnaitė 2014). Geležinkelio BS, PBS ir sankasos sluoksnis veikiami traukinių eismo apkrovų, klimato ir aplinkos oro veiksnių deformuojasi, dėl ko kinta kelio kokybės indeksas (KKI) (Bai *et al.* 2015; Arasteh khoy *et al.* 2014^a; Xu *et al.* 2011; Išvolt 2008).

Lietuvos geležinkelių apkrovos intensyvumas auga. Krovinių vežimo apimtys 2017 metų pirmą pusmetį buvo 24,5 mln. tonų ir buvo 4,6 % didesnis nei 2016 metų pirmą pusmetį, keleivių vežimas padidėjo 3,8 %, t. y. 80 tūkst. daugiau lyginant tą patį laikotarpį (AB „Lietuvos geležinkeliai“ 2017). Geležinkelio kelių ilgis yra 1911,3 km (AB „Lietuvos geležinkeliai“ 2013). Augantis geležinkelio apkrovos rodiklis, rodo geležinkelių transporto didėjančią svarbą tarp kitų transporto rūšių. Labai svarbu išlaikyti esamų kelių gerą techninę būklę bei statyti naujus patvarius geležinkelio kelių. Lietuva – tranzitinė šalis, turinti išvystytą geležinkelio infrastruktūrą (1.1 pav.), nuo kurios priklauso šalies ekonominiai rodikliai.



1.1 pav. Geležinkelių infrastruktūra Lietuvoje (AB „Lietuvos geležinkeliai“ 2014)
Fig. 1.1. Infrastructure of Lithuania railways (AB „Lietuvos geležinkeliai“ 2014)

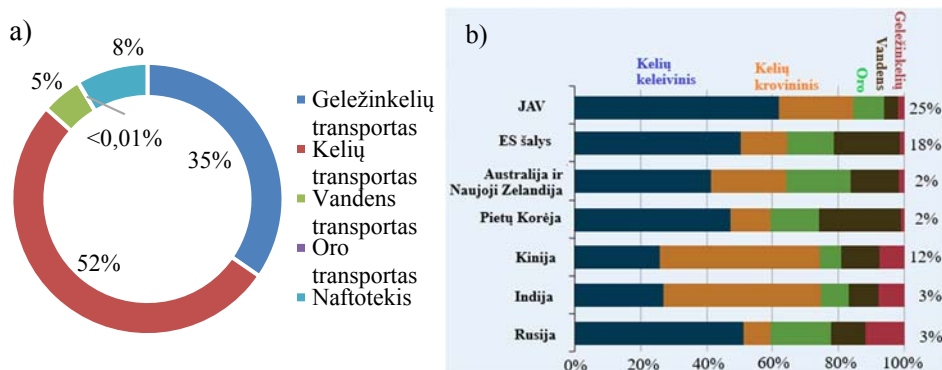
Šią sistemą (1.1 pav.) sudaro 1435 mm ir 1520 mm pločio vėžės. Geležinkelio keliai susieti su Klaipėdos jūrų uostu, per kur galima vykdyti intermodalinių vežimų Rusijos, Baltarusijos, Latvijos, Lenkijos, Vokietijos, Italijos ir Azijos valstybių kryptimis. „Rail Baltica“ projektas, kuris planuojamas pabaigti 2025 metais, leis Lietuvai integruotis į Europos Sąjungos tarptautinių geležinkelių tinklą bei padidintų geležinkelių transporto vežamų krovinių kiekį ir keleivių skaičių (1.2 pav.).



1.2 pav. Europos geležinkelio kelių tarptautiniai koridoriai TENtec (European... 2017)
Fig. 1.2. International European union railway corridors TENtec (European... 2017)

Geležinkelių transportas turi daug privalumų, lyginant su kitomis transporto sistemomis. Lietuvos geležinkelių sektorius kas met vykdo didelį krovinių ir keleivių vežimo mastą. Ekonominiu požiūriu degalų kaina geležinkelių transporte sudaro tik vieną septintąją lyginant su kelių transportu (1.3 pav.).

Papildomi privalumai yra mažesnis taršos lygis ir didelis saugumas (Bureika *et al.* 2017; Cenek *et al.* 2012; IFEU, SGK 2002; Lingaitienė, Lingaitis 2006; PLANCO, BFG 2007). Pagrindinis geležinkelių transporto minusas yra brangi geležinkelio kelių priežiūra ir remontas, sąlygotas netinkamo apkrovos paskirstymo į GKK.



1.3 pav. Transporto rūšių palyginimas: a) Lietuvoje naudojamų transporto rūšių pasiskirstymas pagal gabenamų krovinių kiekį 2017 I ketv. (Lietuvos... 2017); b) skirtingų transporto rūšių energijos sunaudojimas pasaulio šalyse (IEA 2016)

Fig. 1.3. Comparison of transport types: a) distribution of modes of transport used in Lithuania according to the quantity of goods carriers in the 1st quarter of 2017 (Lietuvos... 2017); b) energy consumption of different types of transportation worldwide (IEA 2016)

Ši problema gali atsirasti dėl BS susidėvėjimo arba apatinių sluoksnių lūžimo (Esmaili *et al.* 2014; Indraratna *et al.* 1998; Navikas *et al.* 2016). Didinant geležinkelio riedmenų greičius keliuose, didėja ir geležinkelių techninės priežiūros išlaidos geležinkelio keliams, kurios gali sudaryti net iki 55 % visų priežiūrai reikalingų išlaidų (Lopez-Pita *et al.* 2008).

1.2. Geležinkelio kelio įrengimo technologijų analizė

Prieš pradėdant geležinkelio kelio tiesimo darbus privalomai turi būti atliekami paruošiamieji darbai. Nuo būsimos geležinkelio kelio statybos vietos, sandėliavimo vietų, skirtų laikyti GKK sluoksnių medžiagas, pašalinamas dirvožemis, kuris turi būti sandėliuojamas.

GKK įrengiama sluoksniais, juos išlyginant ir sutankinant (statinis deformacijos modulis (E_{v2}), turi būti ne mažesnis kaip 45 MN/m², dinaminis deformacijos modulis (E_{vd}) turi būti ne mažesnis kaip 35/30 MN/m²) (Apsauginio... 2013). Sluoksnių storiai nustatomi priklausomai nuo reikalingo grunto tankumo ir turi būti ne storesni nei nurodyta reglamentuojančiame dokumente „Apsauginio sankasos sluoksnio įrengimo instrukcija“, (Lietuvoje ne daugiau kaip 0,5 m). GKK šlaitai dažniausiai daromi su 1:1,5 nuolydžiu. Šoniniai šlaitai turi būti apsaugoti nuo erozijos (vandens, krušos, vėjo ir t. t.), užpilant 0,1 m storio dirvožemio sluoksnį ir apšėjant jį žole.

Prieš pradėdant viršutinės konstrukcijos įrengimą būtina įsitikinti, ar tenkinami šie reikalavimai: sankasos pagrindinės aikštelės skersinio profilio atitikimas projektinei linijai, jos paviršiaus lygumą ir grunto sutankinimo atitikimą reikalaujamiems koeficientams. GKK klojimas turi būti vykdomas ant dalinai supilto skaldos BS. Atliekant kelio įrengimo baigiamuosius darbus turi būti vykdomi šie darbai (Subačius 2009):

1. Kelio ir ieško tiesinimas plane ir lyginimas išilginiame profilyje.
2. Ištininis skaldos plūkimas po pabėgiais.
3. Bėgių rikiavimas kreivėse, kelio pertvarkymas vietose su leistiniais vežės pločio nukrypimais.
4. Galutinis balasto prizmės sutvarkymas papildant trūkstamo balasto kiekiu.
5. Trūkstamų tvirtinimų įrengimas, tvirtinimų, pabėgių viršaus ir bėgių valymas.

Baigus GKK viršaus konstrukcijos įrengimo darbus, kelias tikrinimas naudojant matavimo vagonus ir vežimėlius. Tikrinama kelio vežės, bėgių galvutės lygis.

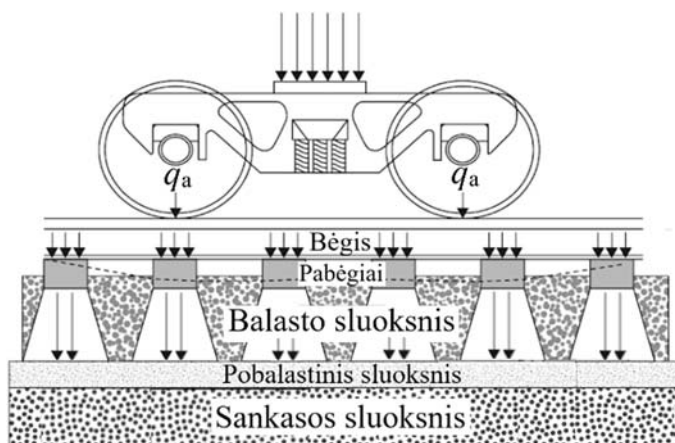
Priimant ir patvirtinant žemės darbus tikrinama paviršiaus lygumas, šlaitų tikslumas, sankasos konstrukcijos atitikimas projektui (skersinis nuolydis, aukščiai, sankasos viršaus plotis ir šlaitų nuolydis).

1.2.1. Pobalastiniam sluoksniui įrengti naudojamos medžiagos ir technologijos

GKK įrengimui naudojamos medžiagos ir jų įrengimo technologijos priklauso nuo geografinės vietos, klimato, didžiausio planuojamo pasiekti riedmenų greičio, metinių eismo apkrovų intensyvumo, tarpusavyje GKK elementų suderinamumo. GKK gali būti įrengiamos tuneliuose, ant tiltų, bet Lietuvoje didžioji GKK dalis yra įrengiama iškasose arba ant pylimų.

PBS tarp BS ir sankasos sluoksnių atskiria juos vienas nuo kito ir saugo sankasą nuo kritulių vandens. Jam rengti naudojamos žvyro ir/ar gerai išrūšiuoto MMM. PBS turi vienodai paskirstyti įtempimus, perduodamus į sankasą, juos mažinti didinant pasiskirstymo plotą. Jis privalo drenuoti lietaus ir požeminį vandenį, veikti kaip skiriamasis sluoksnis tarp BS ir sankasos sluoksnio, neleisti medžiagos dalelėms iš žemesnių sluoksnių migruoti į viršų. Taip pat jis privalo būti toks, kad BS esantis vanduo nutekėtų į sankasą ir nesideformuotų visa GKK geležinkelio kelio eksploatacinio laikotarpio (Selig, Waters 1994; Navikas *et al.* 2016).

PBS įrengti naudojamos mineralinės ir antrinės (perdirbtos) medžiagos ir mišiniai turi būti atsparūs dūlėjimui, šalčiui, spaudimui ir mechaninei apkrovai. Pagrindiniai rodikliai apibūdinantys šiuos mineralinių medžiagų mišinius MMM yra vandens pralaidumas, kuris reglamentuojamas pagal DIN 18 130-1, ir naudojamų



1.5 pav. Geležinkelio kelio konstrukciją veikiančios riedmenų apkrovos (Indraratna *et al.* 2011)

Fig. 1.5. Wheelset loads affecting railway track construction (Indraratna *et al.* 2011)

PBS skirtu rengti MMM optimalią granulimetrinę sudėtį galima parinkti taikant karštai maišyto asfalto (KMA) mišinio mineralinės dalies sudėties projektavimo besąlyginio ir sąlyginio optimizavimo modelius (Sivilevičius *et al.* 2011).

Kitas svarbus veiksnys geležinkelio kelio nusėdimams mažinti yra bituminis PBS, kuris gali vaidinti svarbų vaidmenį ir yra susijęs su dinaminėmis elgsenomis didelio (angl. *high speed*) ir labai didelio (angl. *very high speed*) greičių keliuose (Lopez Pita *et al.* 2004).

Ateities didelio greičio keliams bituminio pobalasto užpildų mišinio naudojimas yra alternatyva visoms nesurištoms rišikliais birioms medžiagoms, naudojamoms geležinkelio kelio PBS įrengti (Teixeira *et al.* 2009).

Gallego *et al.* (2013) pristato geležinkelio kelio pagrindo modeliavimo problemą. Buvo įrodyta, kad kaip alternatyva PBS rengti gali būti panaudoti bituminiai mišiniai. Taigi, jo modelyje yra pateikiama šių mišinių panaudojimo instrukcijos pagrindo sluoksnyje modeliuoti šias medžiagas. Bituminiai mišiniai susideda iš užpildų ir angliavandenilių pagrindu suformuotų rišiklių, kuriuos pastaroji komponentė sujungia į vientisą medžiagą. Vieno, be priemaišų, užpildo egse yra elastoplastiška, o rišiklio viskoelastiška. Kai suformuojamas bituminis mišinys iš užpildų mišinio ir rišiklio, elgsena laikoma viskoelastoplastiška.

Bituminis PBS naudojamas, kaip galima alternatyva visoms granuliuotų sluoksnių ateities didelio greičio geležinkelio keliams. Bituminio PBS sprendimas gali atnešti atitinkamus privalumus sankasos apsaugos ir gyvavimo ciklo požiūriu: sekti skirtingus kelio nuosėdžius ir dinamišką veikimą. Pagal Teixeira *et al.* (2009, 2010) bituminio PBS naudojimo tam tikrose sekcijose sąnaudos būtų panašios į

įprasto granuliuoto geležinkelio kelio sąnaudas. Bituminis PBS galėtų būti naudojamas, kaip vienas iš galimų sprendimų, atsižvelgiant į vietos ypatybes, kai parenkamos GKK naudoti biriosios medžiagos.

Naudojant geležinkelio kelio PBS susmulkintų padangų užpildą (angl. TDA – *tyre-derived aggregate*), jis sumažina 6–47 dB triukšmą kylantį dėl vertikalinių virpesių, sukeltų traukiniui judant ir prailgina geležinkelio kelio gyvavimo ciklą (Esmaeili, Rezaei 2016).

Visuose minėtuose technologiniuose sprendiniuose išlieka problema: neaišku, ar būtina naudoti natūralios kilmės ar dirbtinės, ar joms prilyginamas medžiagas. PBS mišiniai turi būti homogeniški, o jų savybės stabilios, t. y. mažos sklaidos.

1.2.2. Balasto sluoksniui įrengti naudojamos medžiagos ir technologijos

Lietuva – šalis, kurios teritorijoje nėra lengvai pasiekiamų žemės paviršiuje esančių granito uolienų (išskyrus pavienius riedulius). Geležinkelio BS skirta granitinė skalda Lietuvos gamyklose gaminama iš kitose šalyse išgautų ir geležinkelių transportu atvežtų didelių gabalų, sutrupintų Lietuvos akmenskaldėse ir išsijotų per atitinkamo dydžio akučių technologinius sietus.

Lietuvoje naudojamų mineralinių medžiagų (užpildų), skirtų BS įrengti, savybės yra normuojamos LST EN 13450. Šiame standarte pateikti mineralinės medžiagos granulimetrinės sudėties reikalavimai, klasės bei medžiagos standartizuotos savybės: Los Andželo koeficientas (LA_{RB}), Devalio rodiklis (M_{DE}), atsparumas trupinimui (SZ_{RB}), dalelių tankis (DEN_p), įmirkis (WA_{24}), smulkių dalelių klasės, pagal jų procentinį kiekį.

BS fizinės – mechaninės savybės nustatomos atitinkamais metodais tiriant reprezentatyvias imtis. Granulimetrinei sudėčiai nustatyti BS ėminiai imami jų pagaminus iš TJ ir SK. Atvežto į statybietę BS kiti ėminiai imami iš transportuojančio vagono (V) ir paskleidus GKK. Ne tik Lietuvoje, bet ir kitose Europos Sąjungos (ES) šalyse tinkamos žaliavos klodai yra pakankamai toli nuo statybietų, todėl yra taikomi ir tarpinės kontrolės rodikliai granulimetriniai sudėčiai ėminius imant iš V arba GKK. 1.1 lentelėje nėra pateikiamos norminės reikšmės. Joje pateiktos reikšmės naudojamos kaip informacinio pobūdžio reikalavimai.

Neišvengiami granito skaldos segregacijos procesai, jos grūdelių trupėjimas transportuojant ir perkraunant yra ribojami didžiausioms pilnutinėms išbiromis per 22,4 mm sieta pagal skaldos klasę (1.1 lentelė).

Kai kuriose valstybėse (Švedija, Suomija) tiesiamiems ir eksploatuojamiems geležinkelio keliams taikomi šių savybių atitikimo minėtiems standartams korekcijos koeficientai, įvertinantys skaldos trupėjimą ir segregaciją (Skoglund 2002).

1.1 lentelė. Balasto skaldos degradacija transportavimo procese (LST EN 13450:2013)
Table 1.1. Degradation of railway ballast during transport (LST EN 13450:2013)

Bandymo sąlygos	Aprašymas	BS kategorija		
		A	B	C
6,2	Didžiausios pilnutinės išbiros per 22,4 mm sietą	5	7	Nėra reikalavimų
6,2	Didžiausios pilnutinės išbiros per 25 mm sietą	6	8	Nėra reikalavimų

Balasto skalda, naudojama geležinkelio BS įrengti, turi atitikti LST EN 13450:2013 ar aukštesnę kokybę atitinkančio standarto reikalavimus ir tenkinti pagrindinius rodiklius, kurie pateikiami A priede (A1. lentelė).

Geležinkelio BS sluoksniui įrengti gali būti naudojama granitinė skalda, dolomitas ir kitos medžiagos, tenkinančios standartų pateiktų (A priede) keliamus reikalavimus. Vienas iš pagrindinių reikalavimų yra granulimetrinė sudėtis. Pagaminta geležinkelio BS klasifikuojama pagal klases, kurios pateiktos A priedo A.2 lentelėje.

Visos naudojamos medžiagos ir gaminiai privalo turėti LR sertifikatus, atitikties deklaraciją arba gaminio pasą vadovaujantis aplinkos ministro 2009 metų liepos mėn. 23 d. įsakymu Nr. D1-438 „Dėl reglamentuojamų statybos produktų sąrašo“. Ten pat nurodomi šių medžiagų bei gaminių techninius rodiklius norminantys dokumentai – LST, LST EN. Medžiagos ir gaminiai privalo tenkinti šių standartų reikalavimus ir turėti ten nurodytus arba ne blogesnius techninius ir kokybės rodiklius.

GKK vieni iš svarbiausių konstrukcinių elementų yra BS ir PBS. Geležinkelio BS turi priešintis vertikalios ir išilginės jėgoms, išlaikyti GKK geometrinius parametrus, sugerti GKK atsirandančią energiją, užtikrinti greitą paviršinio vandens drenažą, tolygų apkrovos perdavimą apatiniams sluoksniams (Janardhanam, Desai 1983; Navikas *et al.* 2016).

BS įrengti skalda dažniausiai gaminama iš granito, sustingusio lavos, kvarcito, dolomito, kalkakmenio ir kitų natūralios kilmės uolienų. Geležinkelio balasto skaldą sudaro skirtingų frakcijų (dydžių) vienaarūšės medžiagos mišinys. Geležinkelio balasto skaldai senstant ir dėvintis eksploatacijos laikotarpiu palaiapsniui užteršiamas sluoksniš smulkesnėmis dalelėmis. Dėl šios priežasties gali sumažėti šlyties stipris, konstrukcijos standumas ir BS drenuojamosios savybės (Janardhanam, Desai 1983). BS įrengti medžiagos parenkamos taip, kad jos atlaikytų ciklines apkrovas. Dėl šių apkrovų BS sutankėjimas didėja, skalda trupa, dėl ko pakinta granulimetrinė sudėtis, geometriniai rodikliai (BS skersinis nuolydis pakinta) bei atsiranda liekamosios deformacijos (Raymond, Bathurst 1987).

Kai BS neatlieka savo funkcijų arba GKK geometriniai rodikliai viršija leistinas normas, tada taikoma remonto darbai. Arasteh khoy *et al.* (2014^b) teigia,

kad plūkimo vykdymas labai priklauso nuo duomenų surinktų apie kelio būklę ir nėra gerai struktūrizuota kelio degradacijos analizė, kuri padėtų paprasčiau planuoti priežiūras kelio gyvavimo laikotarpiu. Standartinio nuokrypio įvertinimas išilgine kelio kryptimi, kuria vykdomas pamušimas rodo, kad BS pamušimas po pabėgiais vykdomas ne optimaliai suplanavus (Arasteh khouy *et al.* 2014^b, Vale *et al.* 2012).

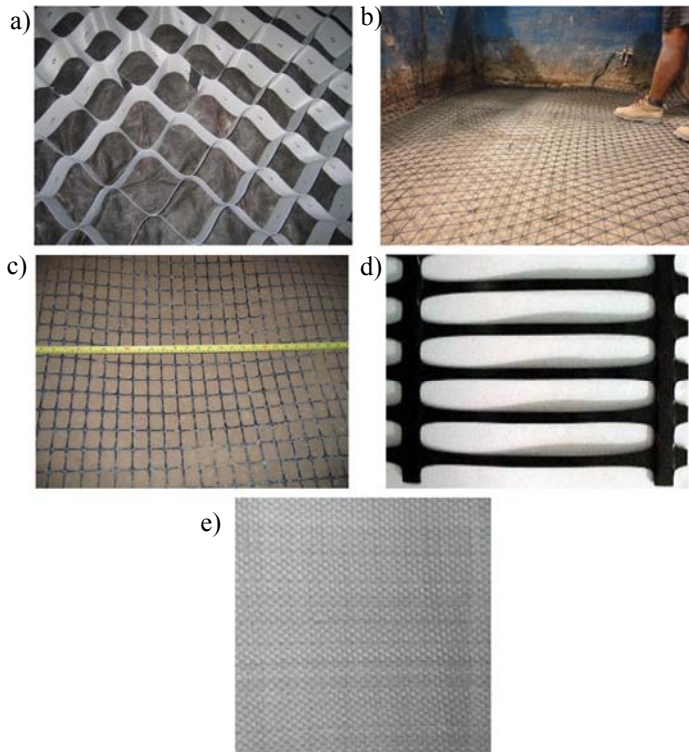
Klotzinger (2008^a, 2008^b) prie pagrindinių GKK rodiklių, lemiančių eksploatacijos ilgaalaikiškumą, priskiria GKK vertikalų standumą ir GKK įrengti naudojamų medžiagų kokybę. Biriųjų medžiagų, naudojamų GKK sluoksniams įrengti, kokybinių rodiklių ilgaalaikiškumą siūloma išlaikyti panaudojant geostintetines medžiagas ir/ar geotinklus (Indraratna, Nimbalkar 2013).

Geležinkelio BS, PBS ir sankasos sluoksnius atskiriant geotekstile sluoksnių dalelės nesusimaišo ir nepakinta GKK sluoksnių savybės ilgesnį laiką, nei be jų (1.6 pav.) (Han, Thakur 2014). Pagrindiniai geotekstilės parametrai ir techninės savybės nurodytos A priedo A.3 lentelėje.

Geosintetinių medžiagų paskirtis – sumažinti įtempį bei deformaciją ir padidinti įrengtų apsauginių sluoksnių laikomąją gebą, išsaugant ilgaalikį efektą. Geosintetinės medžiagos klojamos tarp grunto ir apsauginio sankasos sluoksnio arba saugančio nuo šalčio sluoksnio. Jos dedamos ant sutankintos ir išlygintos sankasos bei užpilamos gruntu. Jas geležinkelio naudojimo metu veikia statinės ir dinaminės apkrovos. Medžiagos veikiamos hidraulinių ir mechaninių procesų įtempio neleidžia smulkiai frakcijai kilti į viršų. Geosintetinės medžiagos – tai neaustinės medžiagos arba geotinklai iš neirių dirbtinių pluoštų, sujungiamų arba susiuvamų terminiu būdu (1.6 pav.).

Mishra *et al.* (2014) pateikia išvadas Ilinojaus universitete vykdyto tyrimo, kuriame kiekybiškai išreiškiamas geotinklų poveikis geležinkelio balasto šlyties stipriui. Naudojant dviejų tipų geotinklą, balasto šlyties stiprio kitimas buvo įvertintas laboratoriniais bandymais ir skaitiniu modeliavimu.

Indraratna ir Nimbalkar (2013) atliko keletą laboratorinių ciklinių tyrimų serijų. Tyrime panaudotas naujai klojamas nusaustas geležinkelio balastas, įrengtas iš granito skaldos su dviašiais geotinklais, neaustininėmis geotekstilėmis ir geokompozicinių medžiagų tarpais tarp BS, PBS ir sankasos sluoksnio. Dviašis geotinklas ir neaustinė geotekstilė buvo efektyvi, nes sumažėjo konstrukcijos nusėdimas, dalelių judėjimas ir dalelių trupėjimas veikiant ciklinėms aprovoms. Geotinklas buvo veiksmingesnis už geotekstilę dėl stipresnio mechaninio ryšio sukabinant balasto daleles tarp tinklo akių. Naudojant geokompozicines medžiagas buvo įrodyta, kad veiksmingai kontroliuojami įtempiai ir dalelių trupėjimas. Taip pat buvo įrodyta, kad dviejų sluoksnių sutvirtinimai, daugiau sumažina konstrukcijos nusėdimą už vieno sluoksnio sutvirtinimus.



1.6 pav. Geosintetinių medžiagų tipai: a) neaustinė geotekstilė; b) triašis geotinklas; c) dviašis geotinklas; d) vienašis geotinklas; e) austinė geotekstilė (Han, Thakur 2014)

Fig. 1.6. Types of geosynthetics: a) Non-woven geotextile and geocell; b) triaxial geogrid; c) biaxial geogrid; d) uniaxial geogrid; e) woven geotextile (Han, Thakur 2014)

Kuo mažesnė grunto laikomoji geba, tuo sunkesnės neaustinės medžiagos turi būti naudojamos (termiškai apdorotos geotekstilės arba smaigstinės).

Geležinkelio bandymų ruožuose, kuriuose buvo naudojamos skirtingų PBS formos panaudoti geosintetiniai tinklai, kurie sumažino konstrukcijos deformatyvumą. Naudojant geosintetinius tinklus ir geotekstilę, kurie yra ilgalaikiškesni, skirtingų kelio konstrukcijų ruožuose nustatyta, kad trintis padidėja ir taip sumažinama balasto lūžimo tikimybė (Fernandes *et al.* 2008).

Pateiktos išvados (Mishra *et al.* 2014) atliekamo tyrimo Ilinojaus universitete, kuriame kiekybiškai išreiškiamas geotinklo poveikis BS šlyties stiprio elgesenai. Naudojant dviejų tipų geotinklą BS šlyties stiprio poveikis buvo įvertintas laboratoriniais bandymais ir skaitiniu būdu modeliuojant.

Geosintetinės medžiagos, kurios gaminamos iš poliesterio, polipropileno ir polietileno ir naudojamos jei:

1. Tarp grunto ir žvirgždinio smėlio nėra filtracinio stabilumo (apsauga nuo sąveikos erozijos).
2. Nepakankamas vandens nutekėjimas skersinio žemės sankasos nuolydžio atžvilgiu.
3. Žemės sankasoje yra lokalių apibrėžtų ruožų su mažesne laikomąja geba (armavimas ir apkrovos paskirstymas).
4. Daugiasluoksniės sistemos darbo režimas didelių apkrovų ruožuose turi būti pagerintas ilgam laikui.

Eksperimentiniai bandymai ir modeliavimo rezultatai įrodo geosintetinių medžiagų ir geotinklų suteikiamą stabilumą GKK horizontalia ir vertikalia kryptimis. Taip pat mažina deformacijas ypač, kai naudojamos išvalytos arba perdirbtos birosios medžiagos (Han, Thakur 2014; Leshchinsky, Ling 2013).

Rezultatai (Sol-Sanchez *et al.* 2015) rodo, kad panaudojus 10 % (pagal tūrį) susmulkintos gumos granuliu, gali sumažinti BS degradaciją ir tuo pačiu metu, kaip ir BS išsklaidyti energiją – tūrinė talpa padidėja, o konstrukcijos standumas sumažėja. Remiantis šiuo laboratoriniu tyrimu, GKK nuosėdžiai gali būti sumažinti panaudojus elastinius medžiagas.

1.3. Geležinkelio kelio deformacijos ir irtis sukeliantys traukinių eismo ir aplinkos veiksniai

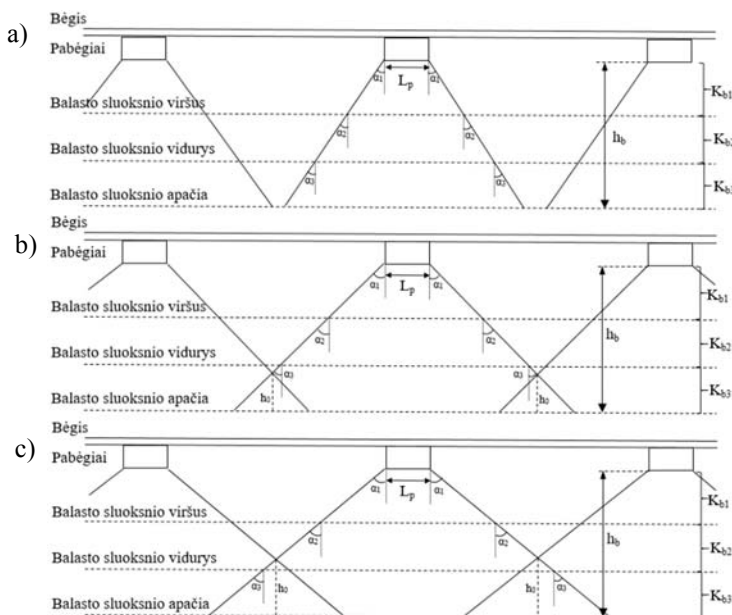
Aukštos kokybės geležinkelio kelias charakterizuojamas mažomis ilgalaikio naudojimo einamosios priežiūros sąnaudomis, nors patiriamas didelio traukinių važiavimo dažnio, augančių eismo greičių ir didėjančių ašies apkrovų poveikis. Be to, geležinkelio kelias turi būti vertinamas bendrai kaip viena sistema. Nuo atskirų sistemos komponentų – pradedant bėgiais ir pabėgiais, skaldos balasto plastinių ir elastinių ypatybių ir baigiant PBS bei apatine kelio dalimi – priklauso kelio kokybė. Taigi kelio laikomoji geba yra pagrindinis rodiklis, kurio prastėjimą gali lemti šios priežastys:

1. Netinkamo drenažo įrenginių darbo arba jų nebuvimo.
2. Kliūčių, neleidžiančių vandeniui nutekėti nuo BS arba GKK šlaitų.
3. Užterštoje skaldoje susidarančių įdubų.

Vokietijos geležinkelių linijų eksploatacijos sukaupia patirtis, naudojant virtualią balastuotą kelio konstrukciją, atskleidė trūkumus: netolygų nusėdimą ir kelio padėties defektus. Pastebėta, kad vietomis suiro BS, kuriose yra nereguliarių reiškinių kaip bėgių defektai, suvirinimo sandūros, izoliacinės sandūros, pervažos, tiltai ir t.t. Dažniausiai šie defektai pasireiškėdavo po 30–60 mln. tonų eksploatacinės apkrovos (kelias nusėdavo apie 20 mm). Taigi būtina atlikti kelio einamosios priežiūros darbus apytiksliai, kas 15 metų naudojimo. Po 30 metų naudojimo

dažniausiai reikia pakeisti skaldos balastą nauju. Tai lemia aukšto dažnio vibracijos, kurias sukelia didelis traukinių greitis.

Didėjant BS standumui mažėja bėgių įtempiai ir įlinkis, bet padidėja jėga atramų taškuose, ko pasekoje sustiprėja skaldos gniuždymas ir tai netiesiškai paveikia bėgio įlinkį (1.7 pav.). Balastuoto kelio konstrukcijos sluoksnio aukšta standumo koeficiento reikšmė (0,4 N/mm) yra nepalanki greitųjų geležinkelių linijoms. Nors mažina dinaminę bėgių apkrovą, daro neigiamą poveikį bėgių gardės stabilumui.



1.7 pav. Slėgio pasiskirstymas geležinkelio kelio konstrukcijos balasto sluoksnyje:

- a) nepersidengiančios slėgio zonos; b) slėgio zonos persidengia balasto sluoksnio apatinėje dalyje; c) slėgio zonos persidengia balasto sluoksnio vidurinėje dalyje (Zakeri, Mosayebi 2016)

Fig. 1.7. Pressure distribution in GKK ballast layer: a) non-overpressure zones;

- b) pressure zones overlap in the lower part of ballast layer; c) pressure zone overlap in the middle part of ballast layer (Zakeri, Mosayebi 2016)

Geležinkelio kelio pagrindo sudedamųjų dalių (BS, PBS ir sankasos sluoksnis) nestabilumas gali būti sukeltas dėl per silpnų naudojamų medžiagų, balasto skilimo, nepakankamos jo kokybės, BS ir kitų naudojamų sluoksnių storio. Balasto kokybės prastėjimo priežastys yra jo dalelių formų ir matmenų kaita, kitų medžiagų įsiskverbimas į PBS, bėgių nusidėvėjimas, taip pat BS ir PBS medžiagų maišymasis (Selig, Waters 1994; Guler 2014; Bai *et al.* 2015).

Geležinkelio BS lūžimas yra viena iš svarbiausių problemų kelio eksploatacijos laikotarpyje, kurią sukelia grūdelių stiprio ir deformacinės savybės (Indraratna *et al.* 2011).

Akmens anglies dalelių įsibrovimas (tarša) į BS ženkliai sumažina sluoksnio šlyties jėgas, todėl gali pagreitinti geležinkelio kelio degradacijos procesus, kas pareikalaus dažnesnio techninės priežiūros darbų atlikimo poreikio. Triašio spaudimo bandymai parodė, kad pastebima BS skaldos tarša anglies dalelėmis ženkliai sumažina sluoksnio šlyties stiprį (Indraratna *et al.* 2014).

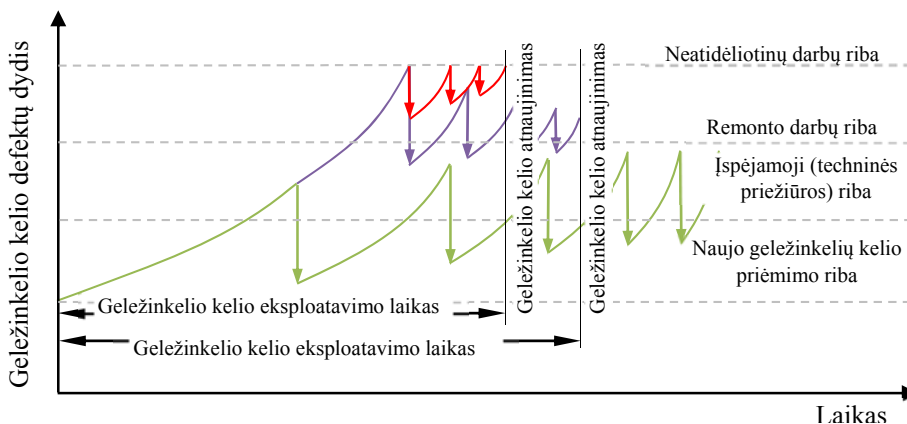
Dalelių migracija, BS ir kitų GKK sluoksnių sąveika yra vienos iš didžiausių problemų eksploatuojamame geležinkelio kelyje (Duong *et al.* 2013).

Pagal Shahu *et al.* (1999) yra du pagrindiniai veiksniai, turintys įtakos geležinkelio kelio gyvavimo ciklui. Iš jų didžiausią įtaką turintis bendrai kelio kokybei yra pagrindo standumo koeficientas. Kiti svarbiausi parametrai yra PBS storis, bėgių inercijos momentas ir pabėgių išdėstymo atstumai. Sankasos įtempiai mažėja, kai PBS storis didinamas, mažinami pabėgių įlinkiai ir PBS esantys įtempiai, nurodantys bendrą kelio gerinimo reikalingumą (Selig, Waters 1994). BS gyvavimo ciklas labiausiai priklauso nuo eismo apkrovų, drenažo, taršos ir yra tiesiogiai susijęs su sluoksnių susimaišymu bei įrengimo standartais (Counter *et al.* 2015).

Geležinkelio kelio geometrijos prastėjimą (degradaciją) sąlygoja pradinės granuliometrinės sudėties neatitikimas, kelio geometrinių parametrų neišlaikymas ir periodiškai atliekami techninės priežiūros darbai. Įprastai techninės priežiūros darbai skirti visai GKK ar BS yra paremti geležinkelio kelio geometrijos ir sluoksnių struktūros tyrimais bei techninės priežiūros darbų efektyvumo nustatymu (Haddani *et al.* 2013).

Geležinkelio kelių techninės priežiūros problema nagrinėjama nuo 1960 metų, metams bėgant ji darėsi daugiau aktualia tema. Tai yra jungiamasis elementas tarp geležinkelio kelių patikimumo su ekonominių aspektų, išreiškiamas kiekybiniu būdu (Dekker 1996) ir yra plačiai taikomas įvairiose geležinkelio kelių eksploatavimo stadijose (Cho, Parlar 1991). Įvairūs techninės priežiūros optimizavimo modeliai yra nuolat tobulinami tam, kad gauti patikimesnę ir tikslesnę metodiką, prognozuojant ir atliekant techninės priežiūros darbus (1.8 pav.) (Sherif, Smith 1981; Cho, Parlar 1991; Dekker 1996; Dekker *et al.* 1997; Kuo, Prasad 2000).

Kai geležinkelio kelio būklė pasiekia ribinį susidėvėjimą yra vykdoma balasto atnaujinimo ir pamušimo darbai, taip sumažinamas kelio defektų standartinis nuokrypis. Po šios techninės priežiūros darbo vyksta kelio defektų eksponentinis didėjimas, kol įvyksta stabilizacija. Jos metu įvyksta grunto sutankėjimas – aštrios briaunos nuskyla ir skaldos dalelės persigrupuoja. Po šios pradinės fazės, defektas ima didėti tiesiškai, o įvertinant eksploatacinę apkrovą šis tiesinis kokybės prastėjimas auga eksponentiškai (1.8 pav.).



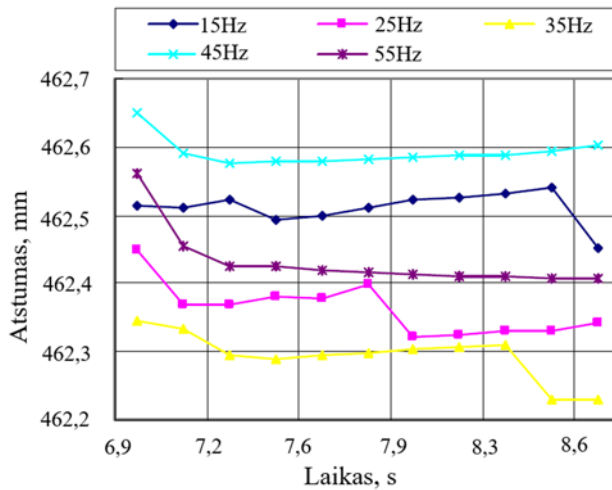
1.8 pav. Geležinkelio kelio gyvavimo ciklas, kada atliekami skirtingais laikotarpiais geležinkelio kelio remonto darbai

Fig. 1.8. Life cycle of railway track when repair works are carried out at different times

Be statinių ir dinaminių eksploatacinių apkrovų, kelio geometriją veikia aplinkos oro sąlygos ir kiti išoriniai veiksniai (cheminės kilmės, augalija). Skaldos užteršimo priežastys yra skaldos grūdelių smulkėjimas ir dilimas veikiant eksploatacinei apkrovai, kylant iš pagrindo medžiagai, kai nepankamas filtravimo efektas, taip pat birieji kroviniai, kurie gali patekti ant GKK ir kelio konstrukcijos užžėlimas. Skaldos užteršimas stabdo vandens nutekėjimą, todėl prastėja kelio laikomoji geba.

Atsižvelgiant į eksploataavimo laikotarpį ir apkrovą, GKK elementai gali būti naudojami tik ribotą laiką, kuriam pasibaigus juos reikia keisti ir/arba atnaujinti (Cecilia *et al.* 2011; Indraratna *et al.* 2010; Zhai *et al.* 2004). Magistraliniams keliams, kurie yra priskiriami padidintos apkrovos eksploataavimo ruožams yra nustatomi apytikriai priežiūros ciklai ir/arba kelio komponentų eksploatacijai. Bet šios reikšmės yra orientacinės, o jų viršijimas reiškia, kad nedelsiant reikia pašalinti vietinį defektą arba apriboti važiavimo greitį.

Moksliniai tyrimai (Heydari *et al.* 2015; Zhou *et al.* 2013) įrodė asinchroninio pamušimo dideliu slėgiu (115–125 bar) pranašumą ir kelio padėtis tampa gerokai stabilesnė nei po tradicinio didelio dažnio pamušimo elipsiniais plūktuvų judesiais. Pamušimo kokybei didelę įtaką turi pamušimo dažnis, amplitudė, slėgis apspaudimo trukmė ir greitis. Esant 35 Hz (1.9 pav.) dažniui, susidaro keliamoji jėga ir vyksta nepertraukiamas kėlimas, o esant didesniai dažniui, pabėgiai nusėda (dėl skaldos tamprumo ir plastiškumo). Esant mažesniai arba didesniai slėgiui skalda vangiai persigrupuoja.



1.9 pav. Skirtingais dažniais atliktų pamušimo darbų palyginimas (Zhou *et al.* 2013)

Fig. 1.9. Comparison of the distances after tamping operation at different vibration frequencies (Zhou *et al.* 2013)

Skirtingų medžiagų kokybės rodiklių ir jų stipruminių rodiklių tyrimas parodė glaudžią koreliaciją tarp šiurkštumo (*FLI*) ir formos (*SI*) koeficientų, taip pat tarp dolomito skaldos šiurkštumo (*FLI*) ir Los Andželo koeficientų (*LA_{RB}*). Koreliacinės sąajos tarp skirtingų gruntų bandinių geometrinių ir stiprumo rodiklių parodė, kad didėjant plokščių ir pailgų dalelių skaičiui bendras mišinio stiprumas mažėja (Bulevičius *et al.* 2013; Huang, Tutumluer 2014; Moaveni *et al.* 2013).

Hidrauliniai elgsenai nustatyti buvo atliktas eksperimentas naudojant didelio mastelio indą. Eksperimento metu simuliuoti sluoksnio įrengto su tinkamu drenavimu garavimo bandymai, siekiant nustatyti siurbimo efekto ir vandens tūrio skirtingose bandinio pozicijose elgsenai. Užteršto BS hidromechaninei elgsenai nustatyti buvo panaudoti įsiskverbimo ir triašis bandymai, esant pasikartojančioms apkrovoms. Nustatyta, kad vandens ir smulkių dalelių kiekis keičia sluoksnio hidraulinę elgseną. Esant vandeniui sluoksnyje, šio sluoksnio elgsena buvo panaši kaip ir daugumos neprisotintų vandeniu gruntų. Hidraulinis laidumas mažėja, didėjant siurbimo efektui (Cui *et al.* 2013).

Eksperimentiniai, skaitiniai ir lauko tyrimų rezultatai patvirtina, kad aukšto dažnio sukelti virpesiai pagreitina BS lūžimus (grūdelių trupėjimą). Šios problemos sprendimui gali būti panaudotos amortizacinės dangos naudojamos tarp BS ir PBS, kurių dėka sušvelninami ir slopinami smūgiai, atsirandantys dėl dinaminių apkrovų. Amortizacinės dangos įrengtos BS apačioje sumažina BS lūžimo ir lie-

kamųjų nuosėdžių tikimybę. Taip pat šios dangos gali būti panaudotos ir BS viršuje po pabėgiu, kurias tiksliai įrengus gaunamas analogiškas rezultatas (Nimbalakar *et al.* 2012).

Išmatuoti rezultatai ir sumodeliuoti rezultatai naudojant baigtinių elementų (BEM) ir diskretinių elementų (DEM) metodais (Aikawa 2013; Aikawa 2015) įrodė, kad dinaminės apkrovos poveikis veikiant 100 Hz dažniu, BS atsilanko (nėlūžta) smūginėms apkrovoms dėl didelio standumo. BS yra neatspariausias žemo dažnio apkrovoms.

Kennedy *et al.* (2013) pateikia laboratorijoje atlikto pilno bandymų ciklo deformacijos rezultatus, kuriame panaudota sutvirtinto ir polimerais sustiprinto geležinkelio BS elgsena. Kiekvieno iš skirtingų geometrinių parametrų sluoksnių rezultatai buvo matuojami po ciklinių, skirtingų dydžių apkrovų. Apkrovimo ir nukrovimo ciklų skaičius yra 500 000. Rezultatai rodo, kad naudojant polimerais sustvirtintą BS 99 % sumažina pradinės liekamąsias deformacijas.

Kritinis trinties kampas sumažėja, kai padidėja bendras spaudimas. Dalelių trupėjimas tankėjimo procese turi didesnę poveikį ties trupėjimo kritine riba (BCSL), nei dalelių trupėjimas šlyties metu (Xiao *et al.* 2014).

Aplinkos oro veiksniai įtakoja ne tik geležinkeliais vežamų krovinių ir žmonių saugumą, bet ir GKK ilgalaikiškumą. Taip pat dėl šių veiksnių įtakos nukenčia kelių pralaidumas bei greitis, todėl traukiniai vėluoja (Liu *et al.* 2012; Rossetti 2007).

Geležinkelio keliui atlikamų techninės priežiūros darbų poreikis ir jų dydis priklauso nuo jo pradinės kokybės. Dėl mažo sąlyčio ploto tarp pabėgio ir BS (nuo 3 iki 5 %) pradiniai nuosėdžiai, dėl BS skaldos lūžimo yra neišvengiami. BS skaldos grūdėliai negali perduoti koncentruotos jėgos – skilimas neišvengiamas, kol vis daugiau ir daugiau grūdelių ima sąveikauti, ir sąlyčio plotas tarp BS ir pabėgių padidės. Deja, šis procesas nėra vienodas ir ties kiekvienu pabėgiu skiriasi ir šie skirtumai sudaro pradinius netolygumus. Judančių traukinių sukeltos dinaminės jėgos kelio degradaciją didina, kol galų gale reikia atlikti techninės priežiūros darbus. BS dėvėjimosi pasekmės yra PBS tarša ir vertikalios lygio nuokrypiai. Iš esmės šios problemos sprendimui egzistuoja du sprendiniai: pirmas, pagerinti BS skaldos kokybę, antras, sumažinti jėgas veikiančias per pabėgius į BS (Berghold, Veit 2013).

1.4. Aplinkos veiksniai

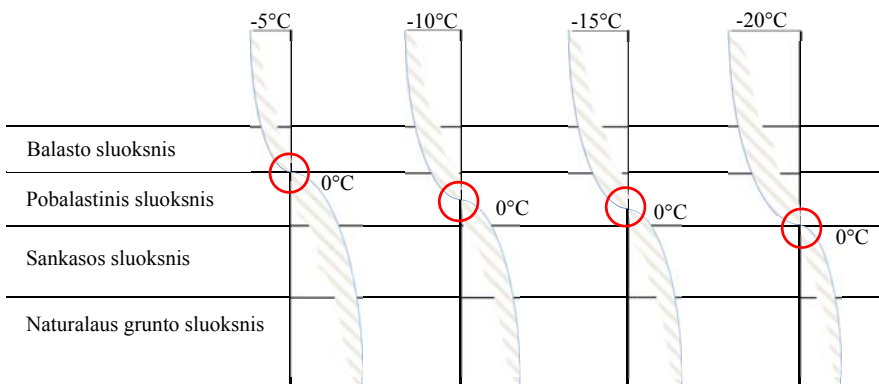
Skirtingose šalyse (JAV (Meyer 2008), Austrija (Harvey *et al.* 2004), Škotija (Galbraith, Price 2005), Anglija (Wooler 2003)) atliekama daug skirtingų tyrimų siekiant nustatyti klimato veiksnių poveikį transportui ir jį sumažinti. Kanada ir

kitos šiaurinės šalys susiduria ne tik su globalinio atšilimo sukeliama padariais, bet ir dažniais užšalimo–atšilimo pasikartojančiais ciklais (Andrey, Mills 2003). Ekstremalių oro sąlygų veiksnių poveikio transporto sistemos elementams vertinimas, rodo, kad tam tikrose vietovėse šių veiksnių sukeltoms pasekmėms likviduoti reikalingi itin dideli finansiniai išekliai (Doll *et al.* 2014).

Daugelyje Europos sąjungos valstybių yra įdiegta kelių oro sąlygų informacinė sistema (KOSIS), skirta sumažinti kelių priežiūros kaštus šaltesiais periodais, užtikrinti eismo dalyvių saugumą ir informuoti eismo dalyvius apie pablogėjusias eismo sąlygas ir užtikrinti saugumą (Laurinavičius *et al.* 2007). GKK fizikinių procesų vyksmas priklauso nuo pasirinktos konstrukcijos tipo ir naudojamų konstrukcinių sluoksnių termostabilumo (Gao, Wu 2015; Wu *et al.* 2007). Vanduo, esantis konstrukciniuose sluoksniuose, turi įtakos ne tik atsirandančioms deformacijoms, bet ir konstrukcijos hidroterminiams režimams. Vandens kiekis konstrukciniuose sluoksniuose varijuoja ir priklauso nuo kritulių kiekio, AOT ir GKK tipo bei geometrinų parametrų (Xu *et al.* 2011; Laurinavičius *et al.* 2016).

Kompleksinis neigiamų veiksnių (traukinių greičio didėjimo ir aplinkos oro veiksnių) vertinimas GKK savybėms yra viena iš pagrindinių problemų sprendžiamų geležinkelių transporte (Hodas *et al.* 2016; Ižvolt *et al.* 2017; Ižvolt *et al.* 2016). Slovakijoje atlikto tyrimo rezultatai pateikiami (VEGA... 2015), kurie rodo izoterminio proceso vyksmą, t. y. kuriame GKK sluoksnyje (gylyje) prasideda vandens kristalų formavimas.

Regionuose, kuriuose temperatūra nukrenta žemiau 0 °C pradeda formuotis GKK sluoksniuose esančios drėgmės kietasis būvis (ledo linzės). Priklausomai nuo to kiek minusinės temperatūros periodas tęsiasi, įšalo gylio reikšmės gali labai kisti (1.10 pav.). Teoriškai tiriant GKK įšalo gylį, didžiausią įtaką iš aplinkos oro veiksnių turi neigiamos temperatūros dydis ir veikimo trukmė.



1.10 pav. Teorinis temperatūrų pasiskirstymas GKK per penkias dienas
Fig. 1.10. Theoretical temperature distribution in railway track construction during 5 days period

Neįvertinant GKK sluoksnių storio esant žemesnei nei minus 10 °C temperatūrai, įšalo gylis neturėtų pasiekti sankasos konstrukcinio sluoksnio viršaus. Sniego dangos storis, esant neigiamai AOT, turėtų mažinti įšalo gylį.

GKK naudojamų medžiagų drėgmė gali labai skirtis, tai ir įšalo gylis gali būti skirtingas. Be temperatūros kitimo, kitas veiksnys yra sniego dangos storis ir/arba kirtulių kiekis, kurie lemia konstrukcinių sluoksnių įšalo gylį.

Sniego danga sausumos transporte ant automobilių kelių ir geležinkelio kelių turi skirtingą poveikį transporto priemonių eismo rodikliams. Ant automobilių kelio dangos esantis sniego sluoksnis mažina rato sankibos su danga koeficientą ir didina pasipriešinimą ratų riedėjimui. Šis sluoksnis yra mechaniškai šalinamas arba chemiškai tirpinamas (Ružinskas *et al.* 2016). Ant geležinkelio kelio esantis sniegas yra pavojingas Šiaurės šalyse, kai sniego dangos storis yra didesnis kaip 1 m. Kaip sniego storis įtakoja GKK sluoksniuose vykstančius fizikinius procesus Lietuvoje iki šiol nebuvo tyrinėta.

Sniego sluoksnis esantis ant BS, šalto klimato šalyse, kurioms galima priskirti ir Lietuvą turi pozityvią įtaką GKK sluoksniuose vykstantiems fizikiniams procesams, kai nagrinėjamas įšalo gylio rodiklis. Pakankamai stora sniego danga gali sumažinti konstrukcinių sluoksnių įšalo gylį ir sulėtinti kelio geomterinių parametrų pokyčius.

Šalyse arba jų regionuose, kuriuose kirtulių (sniego) kiekis yra pakankamai didelis (Peel *et al.* 2007), naudojama sniego valymo technika, geležinkelio kelių tirpinimo sistemos, specialios konstrukcijos, mažinančios sniego užsilaikymą ant geležinkelio kelio paviršiaus (Noguchi, Fujii 2000). Kituose regionuose, kuriuose geležinkelio keliai nėra valomi, tai natūraliai susiformavęs sniego dangos storis liekantis ant BS viršaus lieka toks, kokia yra geležinkelio lokomotyvo prošvaisa ir atstumas nuo bėgių viršaus iki BS (apie 0,4 m), esant pakankamai intensyviai traukinių eismui. Šis sluoksnis gali mažėti, nes judėdamas traukinių sąstatas gali nupūsti tam tikrą sniego dangos storį. Didžiausias storis, kuris lieka ant geležinkelio kelio viršutinės konstrukcijos gali būti ne didesnis nei 0,3 m, priklausomai nuo traukinių eismo intensyvumo, naudojamų bėgių ir pabėgių konstrukcijų, esančios aplinkos (konstrukcija įrengta ant pylimo ar iškasoje), bei sniego būvio (*Clarification...* 2004).

1.5. Šalčio poveikio ir grunto įšalo žemėlapiai

Lietuvos grunto įšalo gylio pasiskirstymo žemėlapiai sudaromi meteorologinių stočių ir KOSIS, rodo giliausias (1,2–1,3 m) įšalo gylio zonas žiemos periodu (Juknevičiūtė, Laurinavičius 2008). Baltijos šalių regiono klimato stebėsena atliekama nuolat (Ustrnul *et al.* 2012; Tietäväinen *et al.* 2010; Klavins, Rodinov 2010). Atlikti tyrimai apie klimato kaitą, rodo, kad vykstantis laipsniškas klimato

šilimas, kartais neatspindi konkrečių regionų klimato – negalima pasikliauti bendromis tendencijomis (Morice *et al.* 2012). Kiekvieną regioną ir jo dalį galima vertinti tik konkrečiai stebint kiekvienos meteorologijos stoties duomenis. Lietuvoje 1961–2010 metais ryškiausia vidutinės AOT kilimo tendencija nustatyta žiemą, t. y. vidutinė sausio temperatūra padidėjo labiausiai. Pastaraisiais metais labiausiai šilo Rytų Lietuva. Taip pat statistiškai reikšmingai visoje teritorijoje augo ir vidutinė metinė oro temperatūra, o rudenį, taip pat kaip ir gegužės bei birželio mėn., oro temperatūra kito labai nedaug (Mickievič, Rimkus 2013).

1999–2010 metais 1,3 m įšalo gylis buvo užfiksuotas bent kartą visose meteorologijos stotyse. Naudojant interpoliacijos metodą nustatyti didžiausią įšalo gylį Lietuva suskirstyta į 4 zonas pagal įšalo gylį (1.11 pav.), t. y. pirmoji zona, kur įšalo gylis yra iki 0,8 m, antroji nuo 0,8 m iki 1 m, trečioji – nuo 1 m iki 1,2 m ir ketvirtoji daugiau nei 1,2 m.



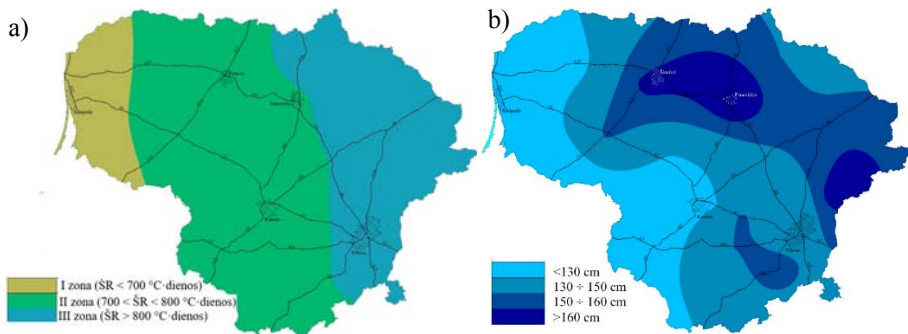
1.11 pav. Didžiausias įšalo gylis remiantis kelių oro sąlygų informacinės sistemos duomenimis, naudojamas kelių transportui (Laurinavičius, Juknevičiūtė-Žilinskienė 2011)

Fig. 1.11. Maximum freeze depth for road transport according to the road weather information system data (Laurinavičius, Juknevičiūtė-Žilinskienė 2011)

Įšalo gylis ir temperatūra grunte priklauso nuo klimato veiksnių, medžiagų tipo, drėgmės esančios aplinkos ore ir grunte, augmenijos ir sniego dangos storio (Laurinavičius, Juknevičiūtė-Žilinskienė 2011).

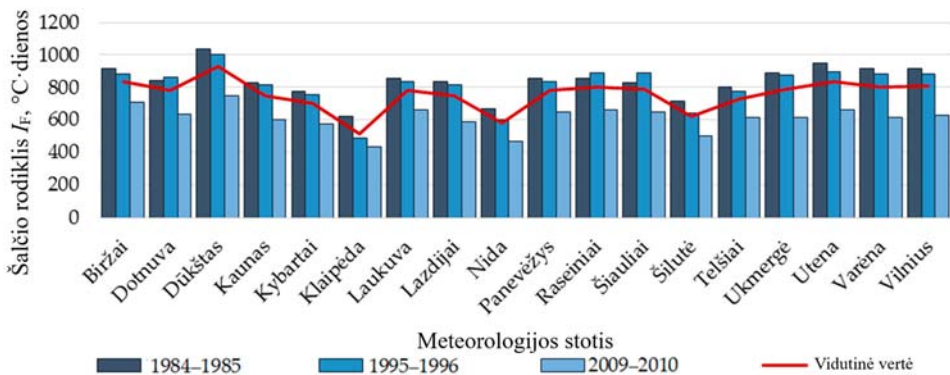
2016 metais (Vaitkus *et al.* 2016) atliktas tyrimas Lietuvos teritoriją remiantis KOSIS suskirstė į 4 zonas pagal įšalo gylį (1.12 pav. b), bet skirtingų ribų, nei 1.12 paveiksle a). Tai rodo, kad nuolat vykstanti klimato kaita lemia skirtingų įšalo gylių zonų kitimą. Remiantis tuo pačiu tyrimu, Lietuvos teritoriją suskirstyta

į 3 zonas, pagal ŠR vertes. ŠR (I_F) verčių kitimas 1984–2010 metais Lietuvos teritorijoje pateiktas 1.13 paveiksle.



1.12 pav. Lietuvos teritorijos dalijimas į skirtingo šalčio poveikio zonas: a) pagal šalčio rodiklį; b) pagal išalo gylį, remiantis kelių oro sąlygų informacine sistema (Vaitkus *et al.* 2016)

Fig. 1.12. Lithuania territory dividing into different zones of frost influence: a) according to the frost index; b) according to freezing depth, based on the road weatherinformation system (Vaitkus *et al.* 2016)



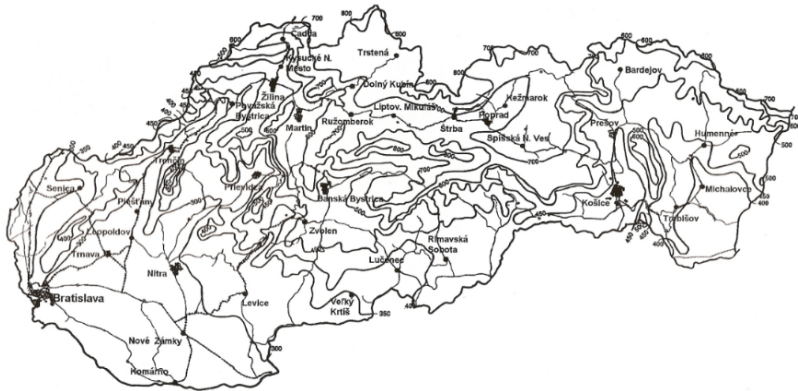
1.13 pav. Šalčio rodiklio verčių kitimas Lietuvoje, skirtingose meteorologijos stotyse (Vaitkus *et al.* 2016)

Fig. 1.13. Changes of frost index values at different meteorological stations in Lithuania (Vaitkus *et al.* 2016)

Atlikti tyrimų rezultatai ir taikoma metodika (Apsauginio... 2013) nedera, kadangi vienu atveju Lietuvos teritorija dalinama į 4 zonas, pagal išalo gylį ir naudojamas ŠR (I_F), o metodikoje naudojama trijų zonų normavimas pagal ŠR (I_F).

Metodikos panašios, nes vertinamas neigiamų temperatūrų poveikis konstrukcijoms, bet šalčio poveikio vertinimo rodikliai ir šalčio zonų sudaryti žemėlapiai skiriasi.

Naujai tiesiamiems geležinkelio keliams Lietuvoje projektavimo metodika (Apsauginio... 2013), kuri skirta ASS storio parinkimui paremta vokiškąja patirtimi ir standartais (DS 836 1999), kaip ir Slovakijos standartizuojantys dokumentai. Pagrindinis skirtumas, kad projektuojamo apsauginio (PBS) sluoksnio storio parinkimui ne kelio sukeliams apkrovoms Slovakijos (1.14 pav.) ir Vokietijos (1.15 pav.) standartizuojančiuose dokumentuose yra pateikiamas įšalo gylių žemėlapis, kuriame valstybės teritorija yra suskaidoma į tris skirtingo įšalo gylio zonas pagal ŠR (I_F): I zona iki minus 350 °C·dienos; II zona nuo minus 350 °C·dienos iki minus 650 °C·dienos; III zona nuo minus 650 °C·dienos.

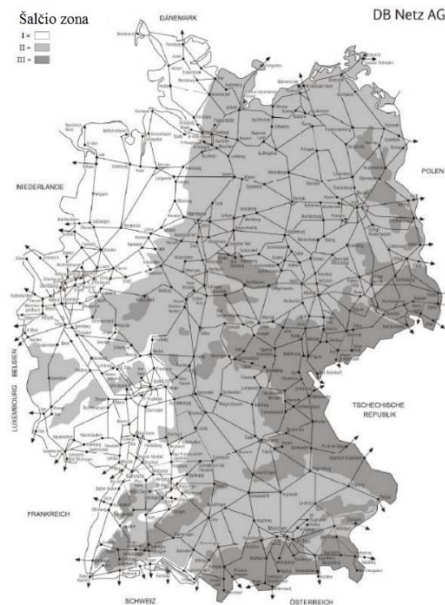


1.14 pav. Projektuojamų ir rekonstruojamų Slovakijos Respublikos geležinkelių šalčio rodiklio vertės (TNŽ 73 6312:2005)

Fig. 1.14. The frost index values for the design and reconstruction of the Slovakian Republic railways (TNŽ 73 6312:2005)

Lietuvos dokumentuose (Apsauginio... 2013) pateikiama, kad projektuojant geležinkelio kelius turėtų būti atsižvelgiama į šias zonas, bet žemėlapis skaidantis Lietuvos teritoriją į šias skirtingas zonas nėra pateikiamas (tik automobilių kelių projektavimui) 1.11 paveiksle.

Taigi, būtina sudaryti tokį žemėlapi, kuris leistų tiksliai įvertinti šalčio sukeliamus padarinius GKK. Taip pat yra naudojama ŠR skaičiavimo metodika, kuri teigia, kad regionuose, kuriuose yra projektuojamas geležinkelio kelias turėtų būti skaičiuojamas ŠR (I_F) šalčiausios žiemos tame regione per paskutiniuosius 50 metų, kai skaičiuojama vidutinių paros neigiamų temperatūrų suma be pertrūkio.



1.15 pav. Vokietijos teritorijos skirstymas pagal šalčio rodiklio zonas (RIL 836: 2013)

Fig. 1.15. Distribution of Germany territory according to frost index zones (RIL 836: 2013)

Valstybės teritorijos dalijimas ir nuolatinis žemėlapių atnaujinimas į šalčio poveikio zonas yra būtinas Lietuvos geležinkelių projektavime. Tikslus neigiamą efektą sukeliančių veiksnių (šalčio) įvertinimas leistų optimaliai naudoti geležinkelių tiesybai skiriamas lėšas bei prailginti kelio eksploatavimo laikotarpį.

1.6. Geležinkelio kelio deformacijos modeliai

Geležinkelio kelio vertikalioji mechanika yra sudėtingas procesas, kadangi yra daug veikiančių veiksnių: aširačių ir geležinkelio kelio sąveika, GKK sluoksnių sąveika, aplinkos veiksnių įtaka, infrastruktūros poveikis konstrukcijai. Pagrindinis tikslas sumažinti vertikaluosius poslinkius, taip sumažinant GKK deformacijas ir prailginant eksploatavimo laiką. Sukurta daug modelių sprendžiant vertikalųjų poslinkių mažinimo problemą (Dahlberg 2001; Dahlberg 2003; Burrow 2007).

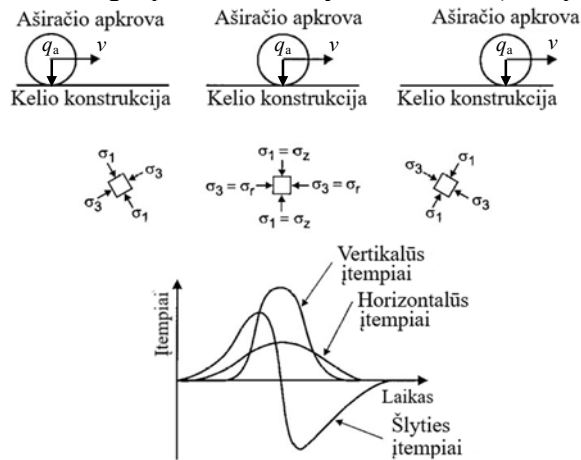
Deformacija – tai kūno formos ir tūrio kitimas dėl veikiančių išorinių veiksnių. GKK atsirandančių deformacijų priežastis galima suskirstyti pagal pagrindinius, jas sukeliančius veiksnus:

1. GKK deformacijos, vykstančios dėl tankinimo procesų.

2. Sankasos deformacijos, dėl savojo svorio.
3. Deformacijos, atsirandančios dėl dinaminių poveikių (1.16 pav.).

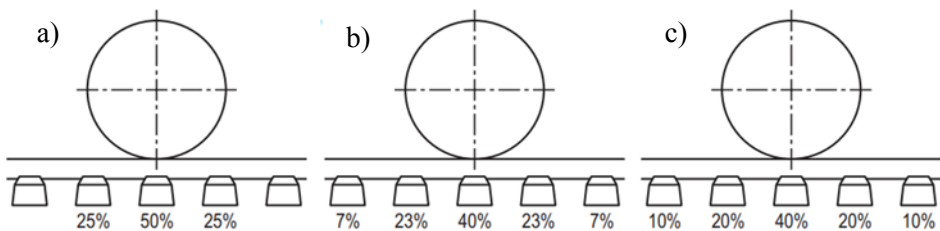
Bing ir Gross (1983) pristatė modelį, kuris galėtų būti naudojamas prognozuoti, geležinkelio kelio kokybės priklausomybę, vertinant pagal kelio kokybės rodiklių pokyčius, kaip priežastinius parametrus, tokius kaip eismas, geležinkelio kelio tipas ir priežiūra (Bing, Gross 1983).

Sprendžiant sistemos „riedmuo–kelias“ uždavinius, viena iš problemų yra, kaip riedmenų apkrova pasiskirsto per bėgius, pabėgius, jų jungiamuosius elementus į GKK. Chen, McDowell (2016), Szurgott, Bernys (2013) atliktuose tyrimuose naudojami skirtingi apkrovos išskirtymo modeliai (1.17 pav.).



1.16 pav. Įtempių tipai kelio konstrukcijoje veikiant judančiai apkrovai (Lekarp *et al.* 2000)

Fig. 1.16. Types of stress in road construction then affects moving load (Lekarp *et al.* 2000)

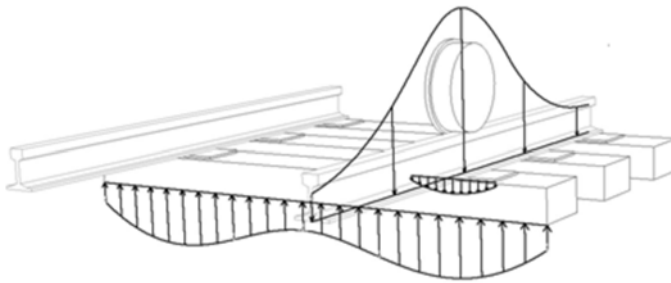


1.17 pav. Apkrovos pasiskirstymas per pabėgius: a) Awoleye *et al.* 1993; b) Aursudkij 2007; c) US Army Corps of Engineers 2000

Fig. 1.17. Load distribution along sleepers: a) Awoleye *et al.* 1993; b) Aursudkij 2007; c) US Army Corps of Engineers 2000

Dažniausiai naudojamas riedmenų vertikalios apkrovos išskirstymo modelis į GKK yra pristatytas Awoleye *et al.* (1993). Veikiant vertikaliai riedmenų apkrovai po aširačiu į esantį pabėgį veikia 50 % visos ašies apkrovos, o į gretimus pabėgius po 25 %.

Sadeghi, Youldashkhan (2005) atliktas tyrimas patvirtino, kad iš skirtingų naudojamų apkrovų pasiskirstymo modelių į GKK yra tiksliausias, kai apkrova į BS pasiskirsto netolygiai – ties bėgių ašimi pasiekima didžiausia apkrovos koncentracija (1.18 pav.). Nustatyta, kad GKK veikiant statinei apkrovai, judančiai 30 km/h ir 300km/h apkrova pasiskirsto vienodai.



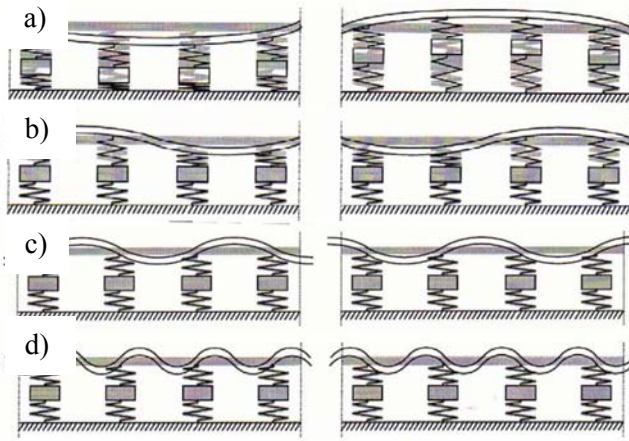
1.18 pav. Ašies apkrovos pasiskirstymas skersine ir išilgine ašimis (Lankhourst Mouldings 2015)

Fig. 1.18. Axle load distribution longitudinal and transverse axes (Lankhourst Mouldings 2015)

Dinaminė reakcija riedmenims važiuojant GKK su kelio profilių pažeidimais dažniausiai atsiranda dėl to, kad vežimėlio savasis dažnis yra mažesnis, nei kelio konstrukcijos pagrindiniai dažniai (1.19 pav.). Dinaminis poveikis greitai apkraunant balastuotą kelią buvo tiriamas naudojant supaprastintą dvimatį BEM, kuris nevertina šoninio poveikio į BS ir sankasos sluoksnį. Antrasis yra išsamus trimatis BEM su kontinuumo elementų BS ir sankasos sluoksnio ir nebaigtinių elementų ribos (Nguyen *et al.* 2014).

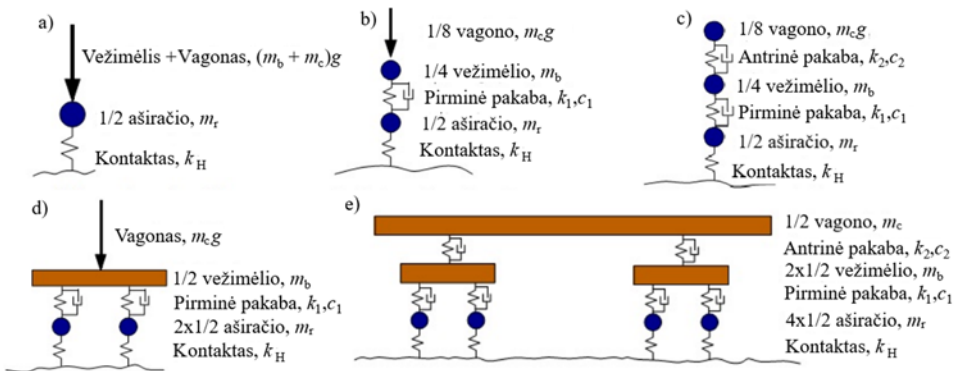
GKK atsirandančių deformacijų dydžiai priklauso nuo judančios apkrovos rodiklių (Somov, Bazaras 2011), todėl praktikoje naudojami skirtingi apkrovos modeliai įvertinantys skirtingą riedmenų parametrų skaičių (1.20 pav.)

Išsamūs trimačiai riedmenų modeliai (1.21 pav.) dažniausiai naudojami, sprendžiant konkrečių riedmenų, bėgių, pabėgių ir padų defektus bei pažaidas (Bogdevičius, Žygienė 2017; Bogdevičius *et al.* 2016; Bogdevičius *et al.* 2015; Dižo *et al.* 2016; Dižo *et al.* 2015).



1.19 pav. Skirtingi geležinkelio kelio rezonansiniai režimai: a) viso geležinkelio kelio vertikalaus rezonansinio dažnio forma; b) bėgių rezonansinio dažnio forma; c) pirmos eilės „pin–pin“ rezonansinis režimas (400–1200 Hz); d) antros eilės rezonansinis režimas (keturis kartus didesnis dažnis nei „pin – pin“) (Kaewunruen, Remeinikov 2007)

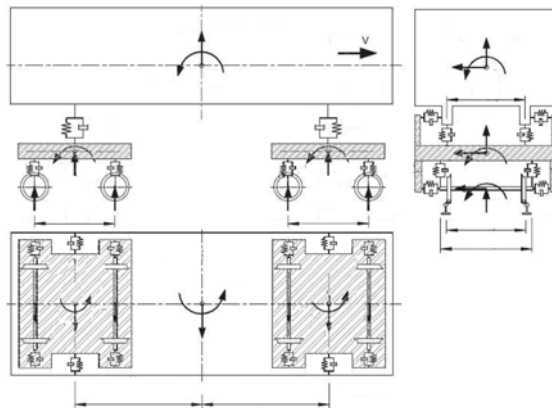
Fig. 1.19. Different resonance regime of railway track construction: a) full track vertical resonant; b) rail resonant; c) first order “pin–pin” resonant regime (400–1200 Hz); d) second order “pin–pin” resonant (four times greater than “pin–pin”) (Kaewunruen, Remeinikov 2007)



1.20 pav. Riedmenų modeliai: a) 1/2 aširačio modelis; b) 1/4 vežimelio modelis; c) 1/8 vagono modelis; d) 1/2 vežimelio modelis; e) 1/2 vagono modelis (Nguyen *et al.* 2011)

Fig. 1.20. Rail vehicle models: a) 1/2 wheelset model; b) 1/4 bogie model; c) 1/8 car model; d) 1/2 bogie model; e) 1/2 car model (Nguyen *et al.* 2011)

GKK poslinkių atsirandančių dėl išorinių apkrovų poveikio ir standumo nustatymo būdai dažniausiai yra griežtai matematiniai arba lauko eksperimentiniais būdais nustatyti (Hall 2003; Al Shaer *et al.* 2008; Costa *et al.* 2010; Nguyen 2013; O'Brien, Rizos 2005; Chebli *et al.* 2008; Giner *et al.* 2016).



1.21 pav. Išsamus trimatis vagono modelis (Nguyen *et al.* 2011)

Fig. 1.21. Full three-dimensional car model (Nguyen *et al.* 2011)

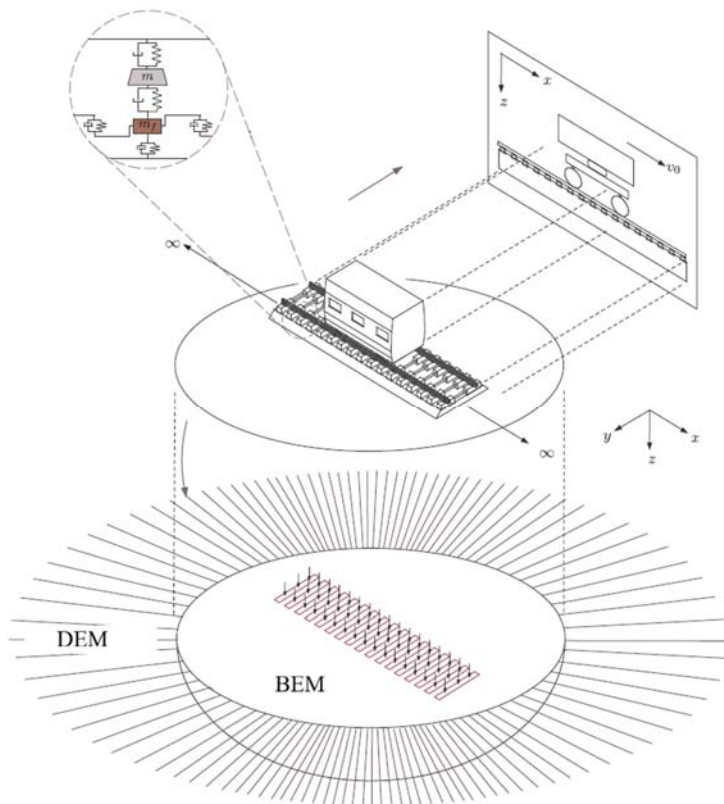
Įprastai sprendžiant problemas susijusias su GKK yra nagrinėjama tik siaura sritis veiksnių įtakančių GKK deformacijas ir poslinkius. Tam naudojami baigtinių, diskrečiųjų, 2D ir 3D programų modeliai programomis (SAP, ANSYS, COSMOS, GEOTRACK, KENTRACK, FLAC, ABAQUS, DIANA, BLOKS3D, PLAXIS, GEOSTUDIO, DARTS, NUCARS, VAMPIRE, GENYSYS, SIMPACK, ADAMS/RAIL-MEDYNA, LS-DYNA, ILLITRACK ir kt.). Gauti siekiamam rezultatui yra supaprastinami ne pagrindiniai autoriaus nagrinėjami procesai, tam, kad optimizuoti modeliavimo procesus (Nicks 2009; Steffens 2005).

Alexandrou *et al.* (2016) pasiūlė sistemos „riedmuo–kelias“ modelį (1.22 pav.). Šiame modelyje išskiriamos dvi dedamosios: GKK poveikis riedmenims ir riedmenų poveikis GKK. Taip pat nustatė, kad supaprastinus viršutinės GKK ir riedmenų elementus galima paprasčiau ir tiksliau vertinti GKK elgseną įtraukiant kitus veiksnius.

Pateiktame modelyje (1.22 pav.) GKK pasiūlyta modeliuoti BEM, o riedmenų sukuriamą vertikalią apkrovą išskirstyti į pabėgių plotą, kuris veikia BS ir likusią GKK. Natūralaus grunto sluoksnio, kuris nepriskiriamas į riedmenų poveikio zoną GKK, modeliavimui siūloma naudoti DEM.

Geležinkelio kelio eksploataavimo laikas priklauso nuo GKK sluoksnių medžiagų savybių ir storių, kurie sudaro BS ir toliau sekančius apatinius sluoksnius. Gallego *et al.* (2013) pateikti modeliai gali leisti nustatyti tempimo ir deformacijos

būkles kiekviename skerspjūvyje. Šie modeliai gali nustatyti medžiagų ir sluoksnių tempimo ir deformacijos būklę kiekviename skerspjūvyje, kas yra svarbu geležinkelio kelių projektavimo etape.



1.22 pav. Sistemos „riedmuo–kelias“ modelis (Alexandrou *et al.* 2016)

Fig. 1.22. System “car-track” model (Alexandrou *et al.* 2016)

Woods (1968), Connolly *et al.* (2015) pateikia deformacijų kiekybines išraiškas, kuriomis pažymi, kad vertikalios deformacijos sudaro daugiau kaip 60 % visų esančių deformacijų (1.23 pav.)

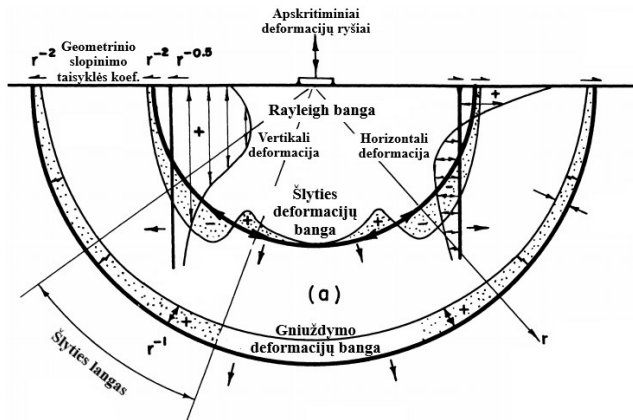
Priklausomai nuo riedmenų sukuriama apkrovos pobūdžio energijos atidavimas vykstant deformacijoms skiriasi: Rayleigh – 67 %, šlyties – 26 %, gniuždymo – 7 % (Woods 1968).

Prie išorinių veiksnių Casagrande (Cassagrande 1953; Cassagrande 1975) priskiria atsparumo šalčiui kriterijų, kuris priklauso nuo:

1. ŠR, matuojamo laipsniais per parą – neigiamų parų temperatūrų sumos.
2. Netolygumo koeficiento.

3. Grunto kapiliarumo.

Pagal Casagrande (1953) gruntas laikomas atspariu šalčiui, jei esant netolygumo koeficientui $U > 15$ yra ne daugiau kaip 3 % frakcijos, kurios dydis siekia iki 0,02 mm, jei $U < 15$ – ne daugiau kaip 10 % tos pačios frakcijos ($U = d_{60}/d_{10}$).



1.23 pav. Geležinkelio kelio konstrukcijos deformacijų ryšiai (Woods 1968)

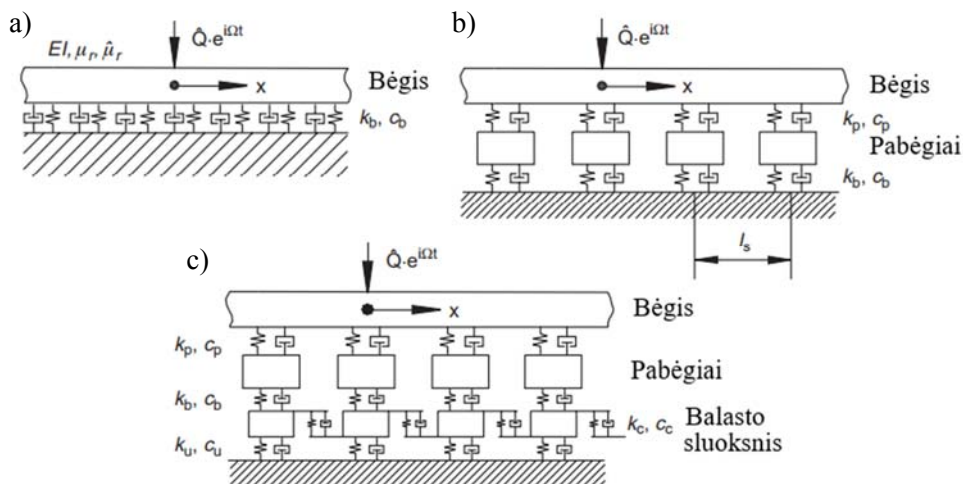
Fig. 1.23. Deformations relations of railway track construction (Woods 1968)

Jeigu gruntas yra jautrus šalčio poveikiui, tada papildomai reikia apskaičiuoti atsparumą šalčiui. Skiriama visiška arba dalinė apsauga nuo šalčio. Dalinė apsauga nuo šalčio reiškia, kad šaltomis žiemomis leidžiamas ribotas šalčio įsiskverbimas į šalčiui jautrų gruntą. Visiška apsauga nuo šalčio turi būti taikoma naujiems didelio greičio bebalasčio geležinkelio ruožams.

Atsižvelgiant į GKK ir klimato sąlygas, neatsparią šalčio poveikiui sankasą taip pat galima apsaugoti įrengiant termoizoliacinius sluoksnius iš putų polistireno betono (betono EPS) 0,16–0,2 m storio, kieto putplasčio plokščių 0,05–0,1 m padengiant ne mažesniu nei 0,1 m apsauginiu smėlio sluoksniu.

Moné ir Boutonnier (2012) pristatė neabsorbuojančio grunto teorinį modelį. Jame atsižvelgiama į tris pagrindinius komponentus grunte: orą, vandenį ir grunto daleles. Buvo panaudota deformacija keturiems skirtingiems junginiams: neabsorbuojančio grunto su oru pastovioji fazė (domenas D1), neabsorbuojančio grunto su oro tuštymėmis sąveikaujančiomis su grunto dalelėmis (domenas D2), neabsorbuojančio grunto su oro burbuliukais (domenas D3) ir absorbuojančio grunto su oru ištirpinto vandenyje (domenas D4).

Naudojant GKK DEM (1.24 pav.) gaunami artimesni realiai konstrukcijai rezultatai lyginant su kontinuumo analize nesurištų konstrukcijų medžiagų, tokių kaip geležinkelio balasto skalda (Huang, Tutumluer 2014). Straipsnyje pateikiama dalelių formų skaitmeninis generavimo metodas, skirtas DEM, kuris leidžia sukurti įvairių formų grūdėlius (Nguyen *et al.* 2014).



1.24 pav. Balastuoto geležinkelio kelio modeliai: a) geležinkelio kelio ant elastingo pagrindo modelis; b) geležinkelio kelio su atskiromis atramomis; c) geležinkelio kelio modelis įtraukiant balasto sluoksnio masę ir šlytį (Knothe, Wu 1998)

Fig. 1.24. Ballasted track models: a) model of track on an elastic support; b) model of track on a discrete support; c) discrete model of track, taking account of ballast mass and shear (Knothe, Wu 1998)

Standarte (International... 1984) pabrėžiama, jog BEM yra tinkamesni už DEM ir yra dažniau naudojama GKK projektavimo darbams.

Atlikus modeliavimą ABAQUS programiniu paketu, kuriame pritaikyti BEM (Lysmer, Kuhlemeyer 1969) ir analitiniai (Kausel 1994) metodai bei sąlygos, Li ir Bian (2016) simulavo traukinio sąstato judėjimą skirtingais greičiais (36 km/h, 72 km/h ir 108 km/h). Sąstatas suformuotas iš trijų vagonų (ašies apkrova 145 kN). Gauti GKK didžiausi vertikalūs poslinkiai, skirtingais greičiais kito nuo 0,27 iki 0,45 mm.

Klasikiniai ir skaitiniai metodai buvo aptarti Shoaee *et al.* (2012), apie dviejų sluoksnių deformacijas ir jų elgseną esant apkrovai, iš kurių vienas yra dirbtinis neuroninis tinklas ANN (angl. *Artificial Neural Network*), kuris yra pažangi interpoliacinė priemonė, pajėgi prognozuoti įvairių gruntų savybes.

Geležinkelio kelio geometrijos degradacijos (angl. *The Bayesian model*) leidžia įvertinti neaiškumą, susijusį su prastėjimo parametru (angl. *degradation parameters*) per visą geležinkelio kelio gyvavimo ciklą. Išankstiniai tikimybių skirstiniai buvo pritaikyti geležinkelio kelio geometrijos degradacijai įvertinti, kurie rodo, geriausiai tinkantis pasiskirstymo modelis vertinti blogėjimo parametrus yra lognormalusis skirstinys (Andrade, Teixeira 2012).

Caetano ir Teixeira (2016) siūlo geležinkelio kelio geometrijos degradacijos modelį, kuriame įtraukta aplinkos oro sąlygų neapibrėžtumo sąlyga į prognozuojamą kelio geometrijos patikimumo parametą. Degradacijos modelyje įtrauktas daugiakriterinis optimizacijos būdas, padedantis įvertinti geležinkelio kelio priežiūros strategijas, jų sąnaudų patikimumą ir kompromisą.

BS su santykinai žema slėgimo jėgos absobcija dažnai pasižymi dideliu dalelių trupėjimu krovo darbų metu. Dėl šios priežasties ištirtojo bandinio granulometrinė sudėtis pasikeitė. Prognozuoti, įtempių – deformacijų poveikį, taip pat BS skaldos granulometrinės sudėties kitimą, veikiant spaudimui, pasiūlyta modelyje, kuris rodo pradinės, eksploatacijos metu ir kritinės granulometrinės sudėčių koreliaciją (Sun *et al.* 2014).

Jei skaldos grūdelių forma, grūdelių dydis ir santykinis tankis yra reikiamų savybių, pakanka trijų kintamųjų (trinties, šlyties ir standumo koeficientų) aprašyti deformacijos elgseną (Stahl, Konietzky 2011).

Naudojant du skirtingus geležinkelio kelio ir aširačio sąveikos modelius, nustatyta, kad kelio standumo koeficientas skiriasi priklausomai nuo geležinkelio kelio būklės ir veikiančios vertikalios jėgos (kai ašies apkrova 100 kN, 150 kN ir 200 kN), todėl (Drozdziel, Sowinski 2010; Drozdziel *et al.* 2011) teigia, kad naudoti vidutinio ar unifikuoto vieno kelio standumo koeficiento negalima naudoti, modeliuojant ir prognozuojant geležinkelio kelio elgseną.

Matematinuose modeliuose naudojant anksčiau minėtas programas labai sudėtinga verifikuoti teorinius modelius remiantis eksperimentiniais tyrimais, kadangi daug veiksnių įtakoja GKK. Naudojant matematinio modeliavimo programą TWINS (angl. *Track-Wheel Interaction Noise Software*) atlikas tyrimas su bėgių padais ir jų elgsena nuo plus 40 °C iki minus 20 °C, norint nustatyti, standumo koeficientus, triukšmo lygį ir apkrovos poveikį (Broadbend *et al.* 2009). Tumavičė *et al.* (2017) atliktas išsamus sistemos „riedmuo–kelias“ sukeltų triukšmų vertinimo tyrimas.

Salour ir Erlingsson (2015) atlikti bandymai parodė, kad GKK standumo koeficientas koreliuoja su kitais GKK kokybiniais (geometrijos, atskirų sluoksnių ir medžiagų) rodikliais.

Atliktų (Zakeri *et al.* 2016) eksperimentinių matavimų ir verifikuoto matematinio modeliavimo metu gauti rezultatai, rodo, didžiausių vertikalųjų GKK poslinkių priklausomybę, nuo atstumo tarp pabėgių kitimo, kintant didžiausiai ašies apkrovai (nuo 25 kN iki 250 kN) 1.2 lentelė. Esant 225 kN ašies apkrovai didžiausias vertikalus poslinkis lygus 0,7 mm. Nors visame ašių apkrovų diapozone poslinkiai gali varijuoti nuo 0,11 iki 0,9 mm. Ašies apkrovai pakitus nuo 80 iki 185 kN. didžiausias vertikalus poslinkis padidėjo 83 %, kai atstumas tarp pabėgių 0,6 m. Didžiausių vertikalųjų poslinkių priklausomybės artima logaritminei lygties išraiškai (1.2 lentelė). Remiantis šiais didžiausių vertikalųjų GKK poslinkių

rezultatais, suformuotos GKK standumo koeficiento priklausomybės nuo ašies apkrovos dydžio.

1.2 lentelė. Geležinkelio kelio konstrukcijų didžiausių vertikalų poslinkių ir standumo koeficientų priklausomybės (Zakeri *et al.* 2016)

Table 1.2. Maximal vertical displacements and stiffness coefficients of railway track constructions (Zakeri *et al.* 2016)

Atstumas tarp pabėgių, m	Didžiausias vertikalus kelio poslinkis		GKK standumo koeficientas	
	Priklausomybės išraiška	Determinacijos koeficientas, R^2	Priklausomybės išraiška	Determinacijos koeficientas, R^2
0,50 m	$z = 0,25 \ln(x) - 0,15$	0,97	$z/(10 \cdot q_a) = 0,5 \cdot K^{-0,63}$	0,98
0,60 m	$z = 0,29 \ln(x) - 0,17$		$z/(10 \cdot q_a) = 0,6 \cdot K^{-0,64}$	
0,70 m	$z = 0,32 \ln(x) - 0,18$		$z/(10 \cdot q_a) = 0,73 \cdot K^{-0,66}$	

čia z – didžiausias vertikalus GKK poslinkis, mm; q_a – ašies apkrova, kN; K – standumo koeficientas, kN/mm.

Išanalizavus 1.2 lentelėje pateiktas GKK standumo koeficientų priklausomybes, nustatyta, kad vertikalų poslinkių pokytis buvo didžiausias – 68 %, kai atstumas tarp pabėgių buvo 0,60 m, standumo koeficientų diapozone nuo 20 MN/m iki 120 MN/m. Panašūs rezultatai gauti Sadeghi *et al.* (2017) ir Gallego *et al.* (2011) atliktų tyrimų.

Atsižvelgiant į atliktus tyrimus GKK standumo koeficiento reikšmė nėra pastovi visame geležinkelio kelio ilgyje, todėl poslinkių ir deformacijų dydžiai gali varijuoti. Dėl atsiradusių silpnų vietų visa GKK susilpnėja.

Atlikti devyni skirtingi modeliavimai remiantis reikalavimais pateiktais (International... 1994). Naudojant skirtingus atstumus tarp pabėgių 0,54, 0,60 ir 0,66 m), BS storius (0,15, 0,30 ir 0,45 m), ašies apkrovas (170–220 kN), GKK sluoksniams įrengti naudojamos skirtingų tipų biriosios medžiagos (QS1), (QS2) ir (QS3).

Atlikto tyrimo metu, kai buvo naudojama 1/2 vagono ir viso vagono modeliai, parenkant BS standumo koeficientą 100 kN/mm, naudojant UIC60 bėgių ir pabėgių sistemą, su atstumu tarp pabėgių 0,60 m, BS storis 0,4 m, visos konstrukcijos ilgis 90 m, gauti didžiausi vertikalūs GKK poslinkiai 0,0113 m (Nguyen *et al.* 2011).

Optimali geležinkelio kelio standumo koeficiento reikšmė įprastai svyruoja nuo 70 kN/mm iki 150 kN/mm, priklausomai nuo geležinkelio kelio projektinių greičių, važiavimo kreivių spindulių, didžiųjų ašies apkrovų (Gallego *et al.* 2011)

Lopez Pita *et al.* (2004) nustatyta greitųjų traukinių eismui pageidaujama standumo koeficiento reikšmė – 70–80 kN/mm ir 50–60 kN/mm standartinio greičio linijoms (iki 160 km/h).

Naudojant baigtinių elementų metodą atliktas tyrimas siekiant nustatyti didžiausius vertikaliuosius poslinkius kada buvo įvertinama GKK aukštis, balasto sluoksnio storis, atstumai tarp pabėgių, bėgių padų standumas ir visa GKK sudarančių sluoksnių bendras tampros (Jungo) modulis (Real *et al.* 2012).

Apibendrinant aptartų tyrimų rezultatus, galima teigti, kad standumo koeficientas gali labai varijuoti, todėl skaitiniuose modeliuose reikia eliminuoti visus nenagrinėjamus neigiamą efektą sukeliančius veiksniai, kurie gali įtakoti nustatomus didžiausius vertikalius GKK poslinkius.

1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Lietuvos geležinkelio kelių tinklą sujungus su Europos geležinkelio kelių tarptautiniais koridoriais TENtec dar sparčiau didės keleivių ir krovinių vežimo kiekiai Lietuvos Respublikos teritorijoje. Pagal saugumo ir mažo energijos sunaudojimo aspektus geležinkelių transportas yra pirmaujantis tarp kitų transporto rūšių. Didžiausias trūkumas – geležinkelio kelių techninė priežiūra, kuri priklauso nuo pradinių GKK įrengimo sąlygų, o didėjant riedmenų greičiui gali sudaryti net iki 55 % visų geležinkelio infrastruktūros priežiūrai reikalingų išlaidų.
2. BS ir PBS, įrengti iš biriųjų medžiagų, yra jautriausios GKK dalys, ypač kai riedmenų sukurtos apkrovos pasisiskirstymas į konstrukciją netolygus ir vyrauja riedmenų aukšto dažnio sukeltos vibracijos. Sluoksnių įrengimo technologija, GKK sluoksnių medžiagų kokybė, tarša smulkiais dalelėmis sluoksnius sudarančių medžiagų dėvėjimosi metu, ir aplinkos veiksniai (AOT ir vandens/drėgmės kiekis sluoksniuose) yra veiksniai trumpinantys GKK gyvavimo ciklą.
3. PBS atliekamos vandens drenavimo ir apkrovos tolygaus paskirstymo funkcijos yra daugiausiai lemiančios GKK atsparumą neigiamos temperatūros poveikiui ir atsirandančioms deformacijoms veikiant riedmenų sukurtai apkrovai.
4. Riedmenų sukuriama vertikalios apkrovos į GKK pasisiskirsto netolygiai – ties bėgių ašimi pasiekiamas didžiausia apkrovos koncentracija. Tiksliausias ir dažniausiai naudojamas riedmenų vertikalios apkrovos išskirstymo modelis yra, kada apkrova po aširačiu į esantį pabėgį veikia 50 % visos ašies apkrovos, o į gretimus pabėgius 25 %.

5. Dažniausiai projektuojant arba skaitiniu būdu modeliuojant visą GKK, veikiant riedmenims, GKK standumo koeficientai naudojami pagal atliktus eksperimentinius duomenis, kurie yra nustatyti laboratorijose arba anksčiau mokslininkų atliktų konkrečių geležinkelio kelio ruožų tyrimų, bet neįvertinama oro, vandens procentinis santykis sluoksniuose.
6. GKK elgsenai prognozuoti ir tyrinėti, kada vertinama veikiančios riedmenų apkrovos ir aplinkos veiksniai, bei detalai aprašomos sluoksnių fizikinės savybės, dažniausiai naudojamas BEM. Nustatytas GKK standumo koeficientas yra vienas iš pagrindinių rodiklių, kuris naudojamas DEM, sprendžiant riedmenų ir jų sąveikos su GKK uždavinius.
7. GKK standumo koeficientas priklausomai nuo projektuojamų greičių turi būti didesnis nei 50 kN/mm. Mažesnės standumo koeficiento reikšmės lemia GKK didesnes deformacijas, o didesnės standumo koeficiento reikšmės – didesnį atsparumą dinaminei riedmenų sukuriamai apkrovai, tačiau mažina bėgių ilgalaikiškumą eksploatacijos metu.

Atlikus literatūros analizę buvo suformuluoti pagrindiniai darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti geležinkelio kelio konstrukcijai (GKK) neigiamą įtaką turinčius veiksnius eksploatacijos metu, kurie lemia jos ilgalaikiškumą.
2. Išanalizuoti kitų mokslininkų sukurtus metodus ir skaitinius modelius, skirtus tyrinėti riedmenų apkrovų poveikį į GKK.
3. Išanalizuoti skirtingas GKK įrengti naudojamas medžiagas, jų savybes ir ištyrinėti balasto ir pobalastinio sluoksniams įrengti naudojamų medžiagų fizines ir mechanines savybes ir įvertinti jų įtaką konstrukcijos eksploatacinėms savybėms.
4. Atlikus eksperimentinius bandymus, sukurti Lietuvos Respublikos projektavimo norminiuose dokumentuose naudojamų ir naudotinų skirtingų GKK skersinių profilių virtualius modelius, leidžiančius nustatyti aplinkos oro temperatūros (AOT), sniego dangos storio ir drėgmės poveikį skirtingų konstrukcinių sluoksnių įšalo gyliui.
5. Atlikus eksperimentinius bandymus ir skaitinį modeliavimą, nustatyti skirtingų Lietuvos geležinkelio kelio deformacijas ir poslinkius kintant AOT ir veikiant didžiausiai ašies apkrovai.
6. Gautus geležinkelio kelio konstrukcijos didžiausių vertikalųjų standumo koeficientų rezultatus palyginti su kitų autorių tyrimų rezultatais ir sudaryti metodiką, skirtą AOT ir riedmenų apkrovų į GKK poveikiui vertinti.

Balasto ir pobalastinio sluoksnių savybių nustatymas, hidroterminio režimo ir vertikalųjų deformacijų modeliavimas

Atlikus mokslinių darbų analizę antrajame skyriuje pateikiama autoriaus parengtos GKK ilgalaikiškumą lemiančių destruktiviųjų veiksnių, GKK savybių, jiems įrengti naudojamų medžiagų schemas. Pateikiami laboratoriniai metodai, kuriais ištirtos GKK sudarančių sluoksnių medžiagų savybės. Pristatomi jungtiniai matematinės statistikos metodai, kuriais vertinamas šių medžiagų savybių homogeniškumo kitimas. Sudaryta nauja neigiamos AOT vertinimo metodika ir Lietuvoje naudojamų skirtingų GKK skersinių profilių modeliai, skirti vertinti fizikinius procesus SV HEAT programiniu paketu. Nustatyta GKK sluoksnių tampros modulių priklausomybės nuo AOT įvertinant konstrukciniams sluoksniams įrengti naudojamų medžiagų, oro tuštymų ir vandens procentinius kiekius sluoksniuose. Sudarytas supaprastintas „riedmuo–kelias“ modelis, GKK ir atskirų sluoksnių didžiausiems vertikaliesiems poslinkiams nustatyti ANSYS programa.

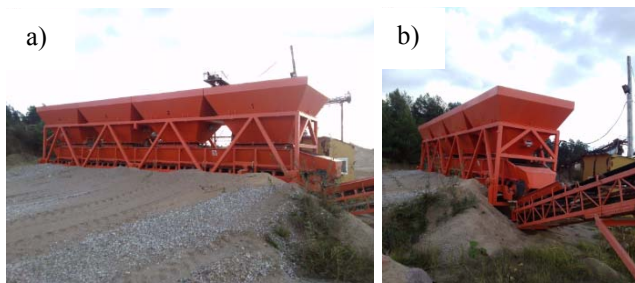
Skyriaus tematika paskelbti keturi autoriaus straipsniai (Navikas, Sivilevičius 2015; Navikas *et al.* 2016; Navikas, Sivilevičius 2017^a; Navikas, Sivilevičius 2017^b).

2.1. Biriųjų medžiagų savybių ir statistinių parametrų nustatymo metodai

Atlikta destruktiviųjų veiksnių poveikio GKK ilgalaikiškumui analizė, rodo, kad GKK medžiagų, naudojamų sluoksniams (BS ir PBS) įrengti, kokybinės savybės yra vienos priežastinių. Šių medžiagų savybės ir įrengimo technologijos lemia GKK atskirų sluoksnių funkcionalumą ir pasipriešinimą destruktiviesiems veiksniams.

Karjere iškasto žvyro sijojimo procese sunku parinkti tokius technologinius parametrus, kurie leistų gauti plačios granulimetrinės sudėties (nuo 0 iki 32 mm dydžio grūdelių) MMM, tinkantį PBS įrengti. Dėl žaliavos (iškasto žvyro) granulimetrinės sudėties variacijos, jame esančių reikiamo stambumo vieno frakcijų gali būti trūkumas, o kitų perteklius, todėl PBS skirtas MMM gaminamas iš kelių (iki 4) skirtingo stambumo frakcijų, reikiamu masės santykiu sumaišytų technologiniame įrenginyje.

MMM, naudojamas geležinkelio PBS įrengti, gaminamas nuolatinio veikimo specialiame stacionariame įrenginyje (2.1 pav.). Skirtingos granulimetrinės sudėties mineralinės medžiagos vienkaušiu krautuvu pilamos į atskirus priėmimo bunkerius. Jos atskiromis frakcijomis pagal parinktą KG1/KG2 mišinio optimalią sudėtį srautais dozuojamos skirtingomis masėmis. Bendrojo transporterio juostos (TJ) nukrovimo galo aukštis nustatomas taip, kad byrantis nuo jo MMM mažai segreguotų ir dalinai gravitaciniu būdu susimaišytų formuojamoje krūvoje. TJ gale vyksta pradiniai segregacijos procesai. Kaip taisyklė (dažniausiai), MMM stambiosios frakcijos nubyra į krūvos apačią, o smulkiosios – kaupiasi krūvos centre.



2.1 pav. Mineralinių medžiagų mišinių gamybos įrenginys (dozatorius) su skirtingų frakcijų dozavimo bunkeriais: a) pakrovimo rampa su priėmimo bunkeriais; b) mineralinio mišinio gamybos gamykla

Fig. 2.1. Mineral aggregate mixture production facility with four different materials and the fraction groups making a dosing bunkers: a) the loading ramp to the reception hoppers, b) mineral aggregate mixture manufacturing plant

Technologiniame procese (2.2 pav.) MMM nepertraukiamai (srautu) gaminamas ir sandėliuojamas pirminėje kūgio formos krūvoje (SK). Iš SK MMM pakraunamas į sunkvežimius, vežamas į statyb vietę ir ten išpilamas ant žemės sankasos. Išpiltas MMM autogreideriu skleidžiamas reikiamo storio sluoksniu ir tankinamas.



2.2 pav. Mineralinių medžiagų mišinio transportavimo ir naudojimo schema

Fig. 2.2. Mineral aggregate mixture uses and transportation scheme

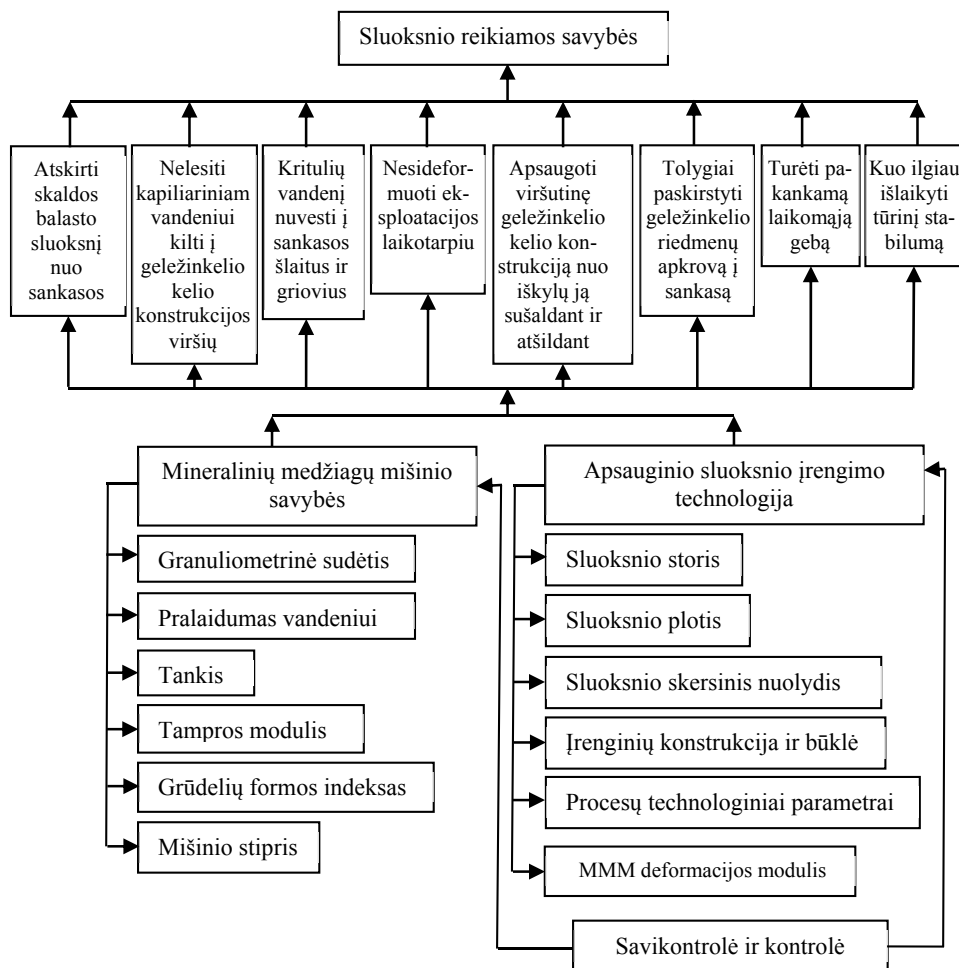
Atliekant visas technologinio proceso operacijas MMM segreguoja. Byrant ir maišantis skirtingo dydžio grūdeliams gali pablogėti arba pagerėti MMM homogeniškumas. PBS atitiktis paskirčiai bei jo ilgalaikiškumas priklauso nuo 3 grupių veiksnių: KG1/KG2 mišinio savybių (kokybės); PBS – ASS įrengimo iš KG1/KG2 mišinio technologijos bei kontrolės ir darbų priėmimo sistemos (2.3 pav.).

2.3 paveiksle pateikta schema leidžia įvertinti GKK ilgalaikiškumo savybę, priklausančią nuo PBS rengti naudojamų MMM kokybinių rodiklių, technologijų ir kontrolės sistemų, kurios turėtų būti tobulinamos.

Įvertinus kitų mokslininkų atliktus tyrimus ir analizuojant BS ir įtaką visam geležinkelio kelio gyvavimo laikotarpiui pateikiamos atskirų destruktiviųjų veiksnių grupės, veikiančios geležinkelio kelią, ir šiam sluoksniui rengti naudojamų biriųjų medžiagų savybių ryšį su visa GKK (2.4 pav.).

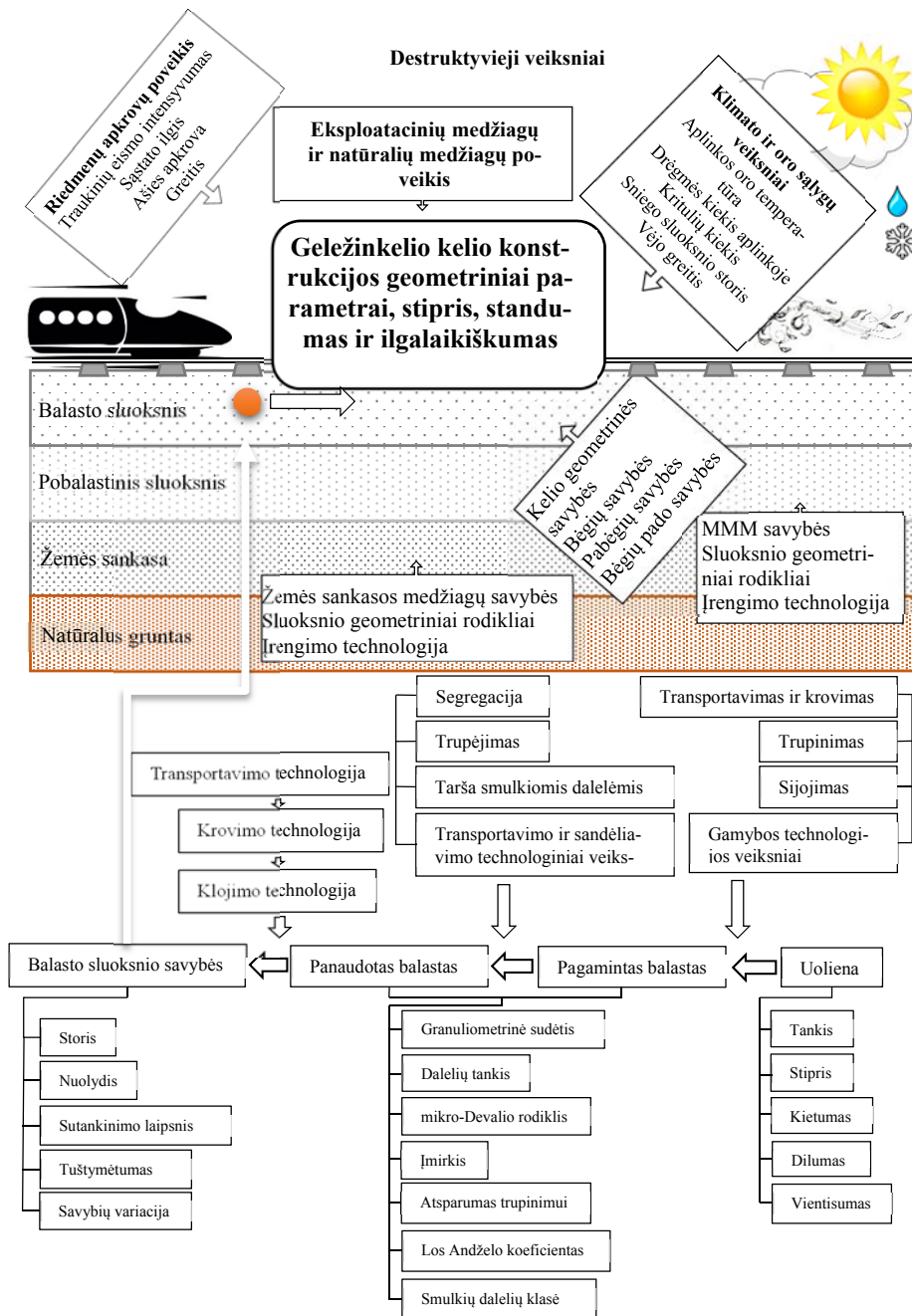
BS, kaip GKK sudamoji dalis, yra svarbi visos GKK ilgalaikiškumo rodikliui. BS rengti skirtos granito (uolienos) pradinės savybės, gamybos, įrengimo proceso technologijos ir paruoštos granitos skaldos savybės (2.4 pav.) yra svarbios dedamosios BS bei visos GKK ilgalaikiškumo rodikliui. Šios savybės ir procesai įtakoja GKK pradinės eksploatacines savybes, kurias veiks destruktivieji veiksniai (2.4 pav.). BS skirtos rengti medžiagos savybių rodikliai įtakoja BS pradinės sąlygas, kuriomis bus eksploatuojama GKK. Atliktos mokslinių šaltinių analizės metu, parengtos schemos (2.3 pav. ir 2.4 pav.), rodo, kad BS ir PBS sluoksniams rengti naudojamų medžiagų savybės, technologinių procesų etapai glaudžiai susiję su GKK eksploatacinėmis savybėmis. Šių rodiklių tyrimas ir vertinimas, leidžia tiksliau vertinti GKK ilgalaikiškumo trumpėjimo priežastis.

Biriųjų medžiagų, mišinių vienas iš pagrindinių rodiklių yra granulimetrinė sudėtis, kuri buvo nustatyta standartiniu būdu (LST EN 933-1:2012). Ji parodo kokybės atitiktį projektiniams reikalavimams. Granulimetrinės sudėties kreivė turi tenkinti projektines normas, todėl vertinti jos formą panaudoti vienodumo koeficientas ir sanklodos rodiklis.



2.3 pav. Pobalastinio sluoksnio reikiamos savybės ir jas įtakojantys veiksniai
Fig. 2.3. Required properties to sub-ballast layers and factors affecting them

Granito skaldos savybes papildomai galima vertinti ir pagal gruntams taikomus reikalavimus. Eksploatacijos metu BS, įrengto iš granito skaldos, apatinis sluoksnis, susimaišo su PBS, įrengto iš MMM, viršutine dalimi. Šių dviejų sluoksnių sumaišytos sritys savybėms įtakos turi granito skaldos ir MMM struktūra bei homogeniškumas. Šias savybes pakankamai sudėtinga įvertinti, nes jų tyrimas norminiuose dokumentuose nenumatytas.



2.4 pav. Geležinkelio kelių konstrukciją veikiantys dėstruktyvieji veiksniai
 Fig. 2.4. Destructive factors affecting railway track construction

Siekiant įvertinti pradinius granito skaldos ir MMM kokybinius rodiklius, panaudoti standartiniai metodai. Sujungus matematinės statistikos ir analizės metodus nustatyta šių medžiagų kokybinių rodiklių skaitinės išraiškos, bei įvertinta technologinių procesų įtaką jų kaitai.

Vienodumo koeficientas C_u apibūdina granuliometrinės sudėties kreivės statumą intervale nuo d_{10} iki d_{60} . Kuo mažesnis vienodumo (2.1 lentelė) koeficientas C_u , tuo vienodesnis ir geriau išrūšiuotas birusis mišinys. Vienodumo koeficientas nustatomas iš (2.1) formulės (LST 1331:2015):

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (2.1)$$

čia d_{10} , d_{60} – dalelių skersmenys, kurie granuliometrinės sudėties kreivės ordinatėje atitinka iki 10 % ir iki 60 % susumuotas tiriamojo MMM/granito skaldos masės dalis, mm.

Sanklodos rodiklis C_c apibūdina biriųjų medžiagų ir mišinių granuliometrinės sudėties kreivės pobūdį intervale tarp d_{10} ir d_{60} ir apskaičiuojamas (LST 1331:2015) pagal formulę (2.2):

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}}, \quad (2.2)$$

čia d_{10} , d_{30} ir d_{60} – dalelių skersmenys, kurie granuliometrinės sudėties kreivės ordinatėje atitinka iki 10 %, 30 % ir 60 % tiriamojo MMM/granito skaldos masės dalis, mm.

Granito skaldos, skirtos rengti BS ir MMM – PBS, gauti granuliometrinės sudėties rezultatai remiantis 2.1 lentelėje. klasifikuojami, norint nustatyti ir įvertinti sanklodą.

2.1 lentelė. Gruntų klasifikacija pagal vienodumo koeficientą ir rūšiuotumo rodiklį (LST 1331:2015)

Table 2.1. Classification soils by uniformity coefficient and rate of curvature (LST 1331:2015)

Pavadinimas	Simbolis	Vienodumo koeficientas C_u	Sanklodos rodiklis C_c
Blogos sanklodos	B	< 6	Bet koks
Geros sanklodos	G	≥ 6	$1 < C_c < 3$
Įvairios sanklodos	P	≤ 6	$< 1 \text{ ar } > 3$

BS rengti skirto granito skaldos rodikliai nustatyti standartiniais būdais. Tankis (DEN_p) ir įmirkis (WA_{24}) nustatyti LST EN 1097-6:2013, mikro-Devalio rodiklis (M_{DE}) – LST EN 1097-1:2011; atsparumas trupinimui (SZ_{RB}) ir Los Andželo rodiklis (LA_{RB}) – LST EN 1097-2:2010.

PBS rengti skirto MMM (KG1) fizinės – mechaninės savybės nustatytos: mišinio tankis (ρ) – LST EN 1097-6:2013; LST CEN ISO/TS 17892-11:2005 – pralaidumas vandeniui (k).

PBS rengti skirto MMM (KG1/KG2) pralaidumas vandeniui (k) priklauso nuo vidutinio tuštymų dydžio. Jam taip pat turi įtakos dalelių dydis, forma ir skirtingo dydžio dalelių santykis. Vandens pralaidumas reglamentuojamas pagal LST CEN ISO/TS 17892-11, DIN 18130-1 ir jis turi būti $k \leq 1 \cdot 10^{-6}$ m/s. Jei naudojami šlakai, tai jis $k \leq 1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Vykstant segregacijos procesams didėja MMM/granito skaldos nehomogeniškumas. Granulimetrinės sudėties variacija, išreiškiama pilnutinių išbirų per visus sietus standartiniais nuokrypiais (s_p). Jų reikšmės priklauso nuo išbirų aritmetinių vidurkių (\bar{p}) ir medžiagos homogeniškumo. Biriosios mineralinės medžiagos arba mišinio granulimetrinės sudėties variaciją pasiūlyta (Mučinis *et al.* 2009; Sivilevičius 2003) vertinti pagal didžiausią pilnutinės išbiros per sietus reikšmę (s_{pmax}). Koreliacinė sietis $s_p = f(\bar{p})$, gauta iš granulimetrinės sudėties eksperimentinio tyrimo, leidžia apskaičiuoti biriosios medžiagos s_{pmax} , neatsižvelgiant į naudotų sietų akučių dydį. Pilnutinių išbyrų per sietus standartinis nuokrypis kinta, priklausomai nuo jų aritmetinio vidurkio pagal regresijos modelį (Mučinis *et al.* 2009; Sivilevičius 2003):

$$s_p = \sqrt{a \cdot \bar{p}^b \cdot (100 - \bar{p})^c}, \quad (2.3)$$

čia a , b , c – atitinkamai nežinomieji modelio parametrai, nulemiantys kreivės formą ir asimetriją; s_p – pilnutinės išbiros per bet kurį sietą standartinis nuokrypis, %; \bar{p} – pilnutinės išbiros per šį sietą aritmetinis vidurkis, %.

Modelis (2.3) rodo, kad didžiausias s_{pmax} būna tų grūdelių, kurie mišinyje sudaro apie 50 % jo masės.

Geležinkelio PBS rengti (statyti) naudojamas MMM ir BS – granito skalda dėl jų gamybos technologinio proceso parametru ir žaliavos savybių variacijos, taip pat sluoksniavimosi gamyklos krūvoje turi tam tikrą nevienalitiškumą. Jo nevienalytiškumą rodo granulimetrinės sudėties ir kitų savybių sklaidos parametrai (standartinis nuokrypis, dispersija, variacijos koeficientas). Norint palyginti stochastiškai pasiskirsčiusias imtis pagal sklaidos parametrus, reikia nustatyti, ar jos atitinka normalųjį (Gauso) dėsnį.

Atsitiktinai paimtos imties normališkumui tikrinti naudojami asimetrijos (SKEW) ir eksceso (KURT) koeficientai, taip pat kriterijai: Kolmogorov-Smirnov

(KS) (Conover 1999), Shapiro-Wilk (SW) (Miller 1986, Madansky 1988, Razali, Wah 2011, Shapiro, Wilk 1965), Pearson (χ^2).

Ar PBS rengti skirto MMM (KG1) ėminių, paimtų iš skirtingų vietų (SK ir GKK) ir BS granito skaldos ėminių paimtų iš TJ, SK, V, GKK normalųjį skirstinį atitinkančių savybių dispersijos statistiškai skiriasi, buvo nustatyta taikant Bartleto kriterijų (Snedecor, Cochran 1989):

$$B = \frac{E}{C} = \frac{2,303 \left[k \cdot \log_{10} \bar{s}^2 - \sum_{i=1}^l k_i \log_{10} s_i^2 \right]}{1 + \frac{1}{3(l-1)} \left[\sum_{i=1}^l \frac{1}{k_i} - \frac{1}{k} \right]}, \quad (2.4)$$

čia l – ištirtų MMM/granito skaldos imčių t. y. ėminių ėmimo vietų skaičius; $k_i = n_i - 1$ – laisvės laipsnių skaičius; n_i – i -osios ėminių ėmimo vietos ištirtų ėminių skaičius; $k = \sum_{i=1}^l k_i$; s_i^2 – i -os ėminių ėmimo vietos procentinių išbirų per laboratorinius sietus paslinkta dispersija; s_i – jos standartinis nuokrypis; \bar{s}^2 – iš visų ėmimo vietų paimtų ėminių imčių svertinis dispersijų vidurkis.

Šis kriterijus dispersijų vienodumui tikrinti tinka, nes yra skirtingi imčių didumai: MMM – $n_{SK} = 14$ ir $n_{GKK} = 35$; granito skalda – $n_{TJ} = 6$, $n_{SK} = 9$, $n_V = 32$, $n_{GKK} = 16$.

Skirtingų technologinio proceso vietų, paimtų imčių svertinis dispersijų vidurkis skaičiuojamas taip (Snedecor, Cochran 1989):

$$\bar{s}^2 = \frac{\sum_{i=1}^l k_i s_i^2}{k}. \quad (2.5)$$

Kruskalo-Voliso (KV) kriterijus naudojamas keturių skirtingų imčių (ėminių ėmimo vietų) skirstinių lygybei tikrinti, skaičiuojant statistiką (Montgomery, Runger 1999):

$$H = \frac{12}{n(n+1)} \cdot \sum_{j=1}^k \frac{r_j^2}{n_j} - 3(n+1), \quad (2.6)$$

čia k – kintamųjų skaičius; n_j – j -ojo kintamojo stebėjimų skaičius $n = (n_1 + n_2 + \dots + n_k)$; r_j^2 – j -osios imties rangų sumos kvadratas.

Nehomogeniško MMM/granito skaldos granulimetrinei sudėčiai ar kitam fiziniam arba mechaniniam kokybės rodikliui nustatyti imami atsitiktiniai vienetiniai ėminiai, kurių mažiausias būtinasis skaičius (duomenų skaičius) apskaičiuojamas iš formulės (Montgomery, Runger 1999):

$$n = \frac{z_{\alpha/2}^2 \cdot \sigma^2}{\Delta^2}, \quad (2.7)$$

čia n – mažiausias būtinasis duomenų skaičius, $z_{\alpha/2}$ – pasirenkamas patikimumo laipsnis (arba tikimybė gauti teisingą atsakymą), matuojamas standartinio nuokrypio vienetais nuo t pasiskirstymo kreivės centro; Δ – leistinoji paklaida tarp apskaičiuoto aritmetinio vidurkio ir tikrojo vidurkio.

Kai Stjudento skirstinio dvipusio testo reikšmingumo lygmuo imamas 95 % (laisvės laipsnių skaičius imamas ∞), tai $\alpha = 0,05$, o $z_{\alpha/2} = 1,96$.

Leistinoji paklaida (angl. *the maximum allowable difference*) skaičiuojama formule (Montgomery, Runger 1999):

$$\Delta = \frac{\delta \cdot \bar{X}}{100}, \quad (2.8)$$

čia δ – leidžiama santykinė paklaida (gali būti 5 %, 10 %, 15 % arba 20 %); \bar{X} – kokybės rodiklio aritmetinis vidurkis.

Biriųjų medžiagų/mišinių granulimetrinė sudėtis gali būti išreiškiama dalinėmis liekanomis ant sietų, pilnutinėmis liekanomis ant sietų ir pilnutinėmis išbiromis per sietus. Aritmetinis vidurkis, nustatytas atskiram sietui šiais trimis būdais, skiriasi. Įprasta biriųjų medžiagų arba mišinio granulimetrinę sudėtį vaizduoti (reikšti) pilnutinėmis išbiromis per sietus. Granulimetrinės sudėties variacija buvo nustatoma pagal didžiausią standartinio nuokrypio (s_{pmax}) reikšmę, atitinkančią pilnutinių išbirų per sietus aritmetinį vidurkį (\bar{p}) artimą 50–70 %.

Leidžiama santykinė paklaida (δ) pasirinkta 5 %, 10 %, 15 % ir 20 %.

BS ir PBS rengti naudojamų medžiagų ir jų mišinių vieno iš pagrindinių rodiklių – granulimetrinės sudėties variacijai vertinti pasiūlyta pagal pilnutinių išbirų per sietus standartinį nuokrypį gautą iš regresijos lygties (2.3). Tai leidžia pagal didžiausią pilnutinės išbiros per sietus reikšmę, palyginti skirtingo homogeniškumo medžiagas vienu skaičiumi. Šio metodo pritaikymas supaprastina GKK rengti naudojamų medžiagų granulimetrinės sudėties vertinimą.

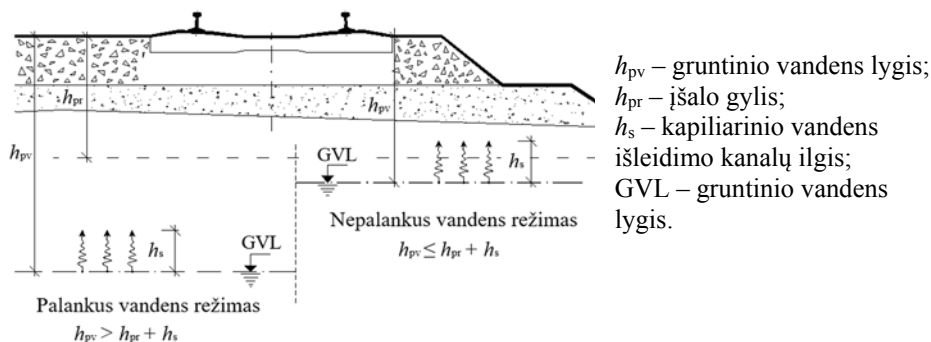
Kitų medžiagų skirtų BS ir PBS rengti kokybinių rodiklių variacijos vertinimui panaudota matematinės statistikos kriterijai: KV ir Bartleto, prieš tai atlikus šių medžiagų savybių pasiskirstymo atitikimo tikrinimą normaliojo skirstinio reikalavimams pagal SKEW ir KURT koeficientus, KS, SW ir Pearson (χ^2) kriteri-

jus. Tiriant kokybinius BS ir PBS rengti naudojamų medžiagų ir jų mišinių savybes aktualu nusistatyti mažiausią ėminių skaičių (2.7 formulė), skirtingiems kokybiniais rodikliams tirti ir analizuoti.

2.2. Klimatinių sąlygų nustatymas ir vertinimas

Keičiantis temperatūriniam režimui, kada neigiama temperatūra pereina į teigiamą, tirpstantis sniegas GKK viršuje skverbiasi į gilesnius sluoksnius. Jei temperatūra vėl tampa neigiama, įšalo gylis gali padidėti, jei BS ir PBS neatlieka drenavimo funkcijos.

Nacionalinė Slovakijos GKK PBS įrengto iš KG1/KG2 parinkimo metodika paremta Vokiškąją patirtimi yra tokia pat, kaip ir Lietuvoje (Apsauginio... 2013). Šio sluoksnio storis tuėtų būti įrengiamas atsižvelgiant į riedmenų sukuriamas statines ir dinamines apkrovas, numatomus greičius, pabėgių ir GKK įrengti naudojamų medžiagų savybes, geografinę vietą. Gruntinio vandens lygis (2.5 pav.) taip pat svarbus veiksnys, kuris lemia GKK terminių režimų vyksmą.



2.5 pav. Vandens režimai GKK (Railway... 2005)

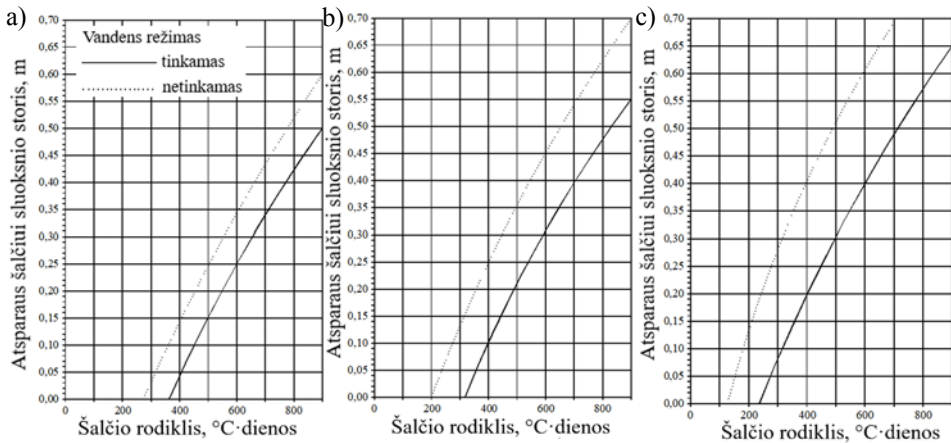
Fig. 2.5. Water regime in railway track construction (Railway... 2005)

Siekiamas PBS storis, nustatomas priklausomai nuo natūralaus grunto atsaprumo šalčiui kategorijos ir vandens režimo remiantis 2.6 paveiksle PBS storis turi būti parenkamas didesnis arba lygus numatytoms projektavimo normų reikšmėms. SRG PBS dažniausiai įrengiamas iš 0/32 mm arba 0/63 mm frakcijų ir jų projektavimo metodika pateikta (Railway... 2005).

Norint papildomai įvertinti konstrukcijos atsparumą šalčio poveikiui kada naudojamos skirtingų specifinių šilumų laidumų medžiagos sluoksniams (Railway... 2005):

$$d_s = \frac{d_{sg}}{\lambda_{sg}} \cdot \lambda_s, \quad (2.9)$$

čia d_s – reikalingo papildomo sluoksnio storis, atsižvelgiant į panaudoto sluoksnio šiluminę varžą, (m), d_{sg} – PBS storis, jau suprojektuoto PBS, (m), λ_s, λ_{sg} – specifinio šilumos laidumo koeficientai, atitinkamai papildomo ir jau esamo, ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).



2.6 pav. Šalčio rodiklio ir atsparaus šalčiui sluoksnio storio sietis, kai projektuojamame–rekonstruojamame geležinkelio kelyje leistinas greitis (v): a) $v \leq 60$ km/h; b) $60 \text{ km/h} < v \leq 120$ km/h; c) $120 \text{ km/h} < v \leq 160$ km/h (Railway... 2005)

Fig. 2.6. The frost index and frost resistant layer thickness relation of projected–reconstructed railway track when the limited speed (v): a) $v \leq 60$ km/h; b) $60 \text{ km/h} < v \leq 120$ km/h; c) $120 \text{ km/h} < v \leq 160$ km/h (Railway... 2005)

Terminis režimas GKK apibūdinamas kaip atskirų sluoksnių ir jų medžiagų terminės radiacijos ir AOT kitimo visuma, apskaičiuota dienoms arba metams. Įšalo gylis (h_{pr}) yra svarbiausias rodiklis apibūdinantis GKK atsparumą šalčio poveikiui. Įšalo gylis (h_{pr}) vertinamas, kaip 0°C gylis konstrukcijoje nuo BS paviršiaus iki konstrukcijos skirtingo sluoksnio gylio, apibrėžiamas, kaip izoterminio proceso buvimas.

GKK temperatūrinis režimas yra kiekvieno konstrukcinio sluoksnio ir natūralaus grunto, bei AOT kitimas, priklausantys nuo saulės spinduliuotės, šilumos emisijos ir AOT per laiko vienetą. Labai svarbu nustatyti šalčio poveikį arba 0°C gylį (h_{pr}) konstrukcijoje, kuris remiantis (Railways... 2005) nustatomas:

$$h_{pr} = 0,045 \cdot \sqrt{I_F}. \quad (2.10)$$

GKK vykstantiems fizikiniams procesams įtakos turi: neigiamos temperatūros poveikis šaltuoju periodu, kuris apibūdinamas ŠR (I_F); konstrukcinių sluoksnių termoizoliacinės savybės; BS ir PBS fizinės – mechaninės savybės; GKK sluoksnių termoizoliacinės savybės; sniegos dangos storis ant GKK.

ŠR (I_F) yra vienas dažniausiai naudojamų parametrų, leidžiančių įvertinti GKK atsparumą šalčio poveikiui. Šis rodiklis nėra pastovus. ŠR (I_F) – didžiausia neigiamų vidutinių paros temperatūrų suma. Kinta kiekvieniais metais ir priklauso nuo aplinkos temperatūrų šaltuoju periodu, kurios savo ruožtu priklauso nuo klimato ir oro sąlygų. ŠR (I_F) apibūdina šaltąjį periodą ir jo galimą poveikį GKK, todėl dažniausiai šis rodiklis naudojamas projektuojant geležinkelio kelių apsauginį sluoksnį. ŠR (I_F) nustatomas sumuojant neigiamas vidutines paros temperatūras (T_p) šaltuoju periodu (Railway... 2005):

$$I_F = \sum_{t_f}^{t_b} T_p, \quad (2.11)$$

čia t_f – pradinis laikas, kai paros vidutinė temperatūra T_p tapo neigiama, diena; t_b – galutinis laikas, kai vidutinė paros temperatūra θ_s paskutinį kartą buvo neigiama, diena; T_p – paros vidutinė temperatūra, °C.

Tikslesnį rezultatą galima gauti naudojantis meteorologijos stočių duomenimis ir vertinti vidutinę paros temperatūrą ne iš trijų matavimų, bet šiam rezultatui gauti reikalingi dideli kompiuteriniai resursai. Šis rodiklis apskaičiuojamas sumuojant vidutines paros neigiamas temperatūras. Vidutinės aplinkos oro temperatūros (T_s), charakterizuojančios visą 24 h laikotarpį, yra apskaičiuojamos iš formulės (Railway... 2005):

$$T_p = \frac{T_7 + T_{14} + 2T_{21}}{4}, \quad (2.12)$$

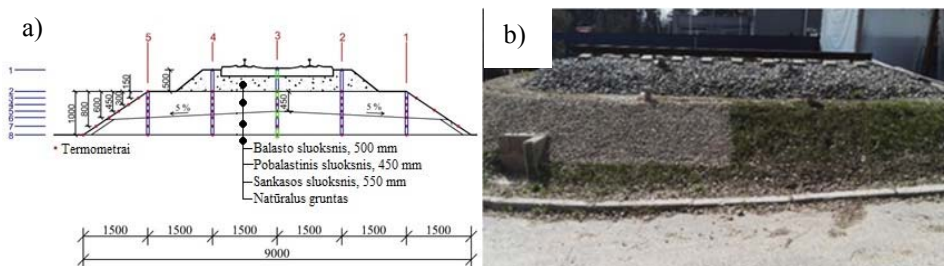
čia T_7 , T_{14} ir T_{21} temperatūros išmatuotos 7:00, 14:00 ir 21:00 2 m atstumu nuo žemės paviršiaus.

Numatyti tiksliai, kokia reikšmė bus ateinančiais metais ar dar tolimesniu laikotarpiu neįmanoma, todėl remiamasi, prieš tai buvusių žiemų ŠR (I_F) reikšmėmis tyrinėjamos ir projektuojamos GKK ir jų savybės.

Naudojant standartinius parametrus, pateiktus standartuose ir norminiuose dokumentuose, neįvertinamos konkrečios medžiagos/sluoksnio savybės. Panaudojus eksperimentiniais tyrimais gautas medžiagų savybes gaunamas iš konkrečių medžiagų įrengtos konstrukcijos modeliavimo rezultatas. Vienas tokių eksperimentinių stendų įrengtas Slovakijoje, Žilinos universitete (2.7 pav.).

Šiame eksperimentiniame lauko stende (2.7 pav.) įmontuoti temperatūros ir drėgmės jutikliai, kurie leidžia nuolat (kas 30 min.) stebėti GKK sluoksniuose

temperatūrą ir drėgmę, bei AOT, realiomis aplinkos oro sąlygomis. Taip galima kiekvienos konstrukcijos individualų modelį, koreguoti įvedant pataisas, gautas iš realios konstrukcijos matavimų. Žaliavinės medžiagos, sluoksnių įrengimo technologiniai procesai ir GKK geometriniai parametrai yra naudojami panašūs arba tokie pat, kaip ir Lietuvoje tiesiamuose geležinkelio keliuose. Taigi buvo panaudotas DRETM II eksperimentinis stendas (2.7 pav.). Panaudojus šį eksperimentinį standą buvo nustatyti GKK sluoksnių terminiai rodikliai: šilumos laidis, tankis, pradinė temperatūra, drėgmės kiekis GKK sluoksniuose (2.3 lentelė).



2.7 pav. DRETM II eksperimentinis stendas: a) eksperimentinio stendo serspjūvis (Ižvolt *et al.* 2017); b) DRETM II šoninis vaizdas

Fig. 2.7. DRETM II experimental stand: a) cross-section of the experimental stand (Ižvolt *et al.* 2017); b) side view of DRETM II

Siekiant įvertinti projektuojamos individualios GKK, pasižyminčios skirtingais geometriniais rodikliais (sluoksnių storis, skersnis ir išilginis nuolydžiai, kelių skaičius ir kt.), eksploatacines savybes, taupant lėšas neįrengiama. Spręsti šiems uždaviniams naudojamos kompiuterinės programos. Viena iš jų yra „SV HEAT“, kuri leidžia stebėti GKK fizikinius procesus, vykstančius kintant realiai užfiskuotai AOT ir kritulių kiekiui, bei GKK sluoksnių fiziniams ir mechaniniams rodikliams. „SV HEAT“ programa sprendžia uždavinius netiesioginio šilumos laidumo nustatymo principu, kada ištirtos medžiagos pradinės terminės savybės (šilumos srautas ir specifinė šiluminė talpa) kinta. Homogeniškų medžiagų savybės apibrėžiamos pagal šilumos skverbimąsi viena kryptimi pagal Furjė išraišką (SV-HEAT... 2009):

$$q(x, t) = -\lambda \cdot \frac{\delta T(x, t)}{\delta x}, \quad (2.13)$$

čia $q(t, x)$ – šilumos – srauto tankis taške x laiko momentu t , ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), λ – šilumos laidumo koeficientas, ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), $T(x, t)$ – temperatūra taške x laiko momentu t , (K).

Vykstant realiems šilumos mainų procesams grunte, jo temperatūra ir šilumos srauto greitis visą laiką kinta. Dėl to temperatūros kitimo greitis grunte yra įvertinamas šilumos tolydumo lygtimi (SV-HEAT... 2009):

$$\frac{\delta q(x,t)}{\delta x} = -q \cdot c \cdot \frac{\delta T(x,t)}{\delta t}, \quad (2.14)$$

čia ρ – tankis, ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), C – specifinė šilumos talpa, ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Taigi, naudojant (2.13) ir (2.14) papildomai yra įvertinami šilumos mainai vertikalia ir horizontalia kryptimis. Taip pat modeliuojant yra įvertinami šilumos laidumo koeficientas (λ), specifinė šilumos talpa (C), tankio (ρ) kitimas.

Šilumos laidumo koeficientas išreikštas iš lygčių (2.13) ir (2.14) (SV-HEAT... 2009):

$$\lambda = 0,249 \cdot \frac{h^2}{\Delta t_c} \cdot \rho \cdot c, \quad (2.15)$$

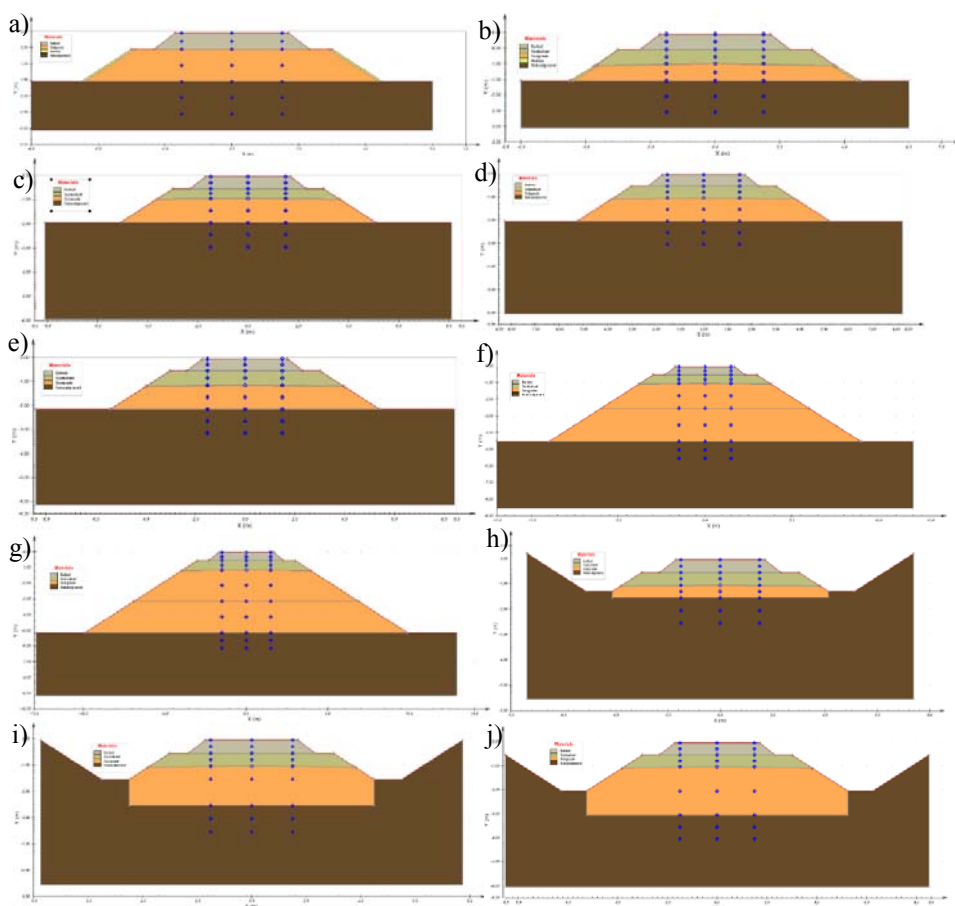
čia h – bandinio storis, m.

Lygtis (2.15) gali būti naudojama grunto įšalo gyliui apskaičiuoti. Skiekiant nustatyti Lietuvos neigiamos AOT poveikį GKK, parengti tipiniai – projektiniai skersinių profilių virtualūs modeliai „SV HEAT“ programoje (2.8 pav.).

Riedmenų sukeliama GKK deformacijoms ir poslinkiams nagrinėti buvo pasirinkta, (2.8 pav. c, d, e) pateiktos konstrukcijos. Likusioms skersinių profilių konstrukcijoms (2.8 pav. a, b, f, g, h, i, j) buvo nustatomi hidroteriminio režimų vyksmai, esant skirtingo ŠR šaltiesiems periodams.

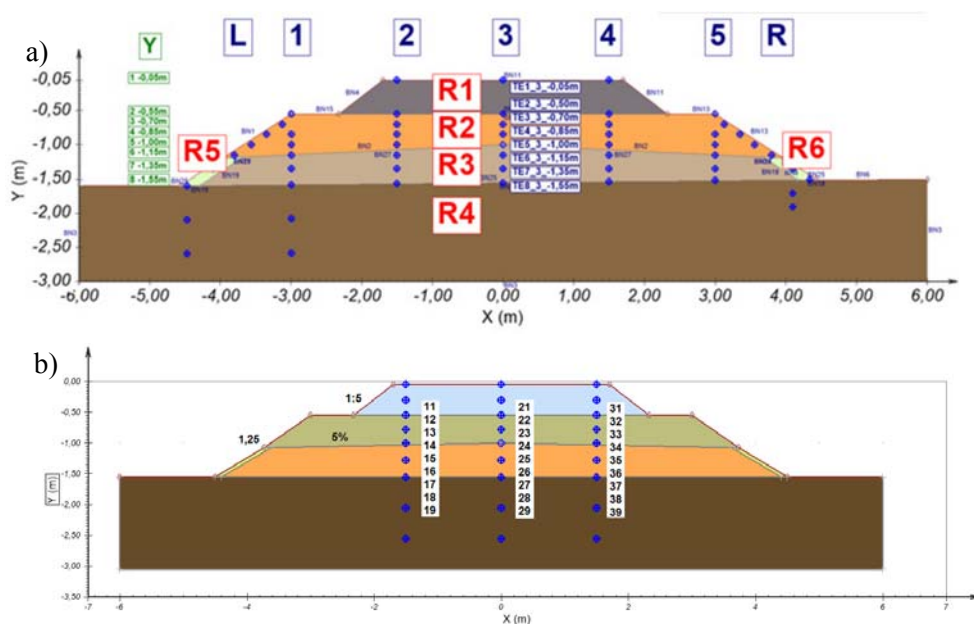
Slovakijoje įrengto eksperimentinio stendo (2.7 pav. a) konstrukcija atitinka Lietuvoje naudojamą skersinio profilio konstrukciją – pylimas P160M160F120R120 su 0,5 m storio PBS (2.8 pav. d). Ekspreimentinio stendo (2.7 pav. a) ir Hodas *et al.* (2016) pristatyto virtualaus GKK skersinio profilio modelio (2.9 pav. a) verifikavimas patvirtina, kad programinis paketas „SV-HEAT“ yra tinkamas spręsti GKK hidreoterminio režimo uždavinius, t. y. vidutinis skirtumas tarp eksperimentinio ir virtualaus modelio gautas skirtumas yra plus/ minus 1 °C.

Nagrinėjamų fizikinių procesų GKK modeliavimo rezultatams gauti, reikalingos aplinkos oro ir vandens savybės, kurios buvo naudojamos modeliuose pateiktos 2.2 lentelėje.



2.8 pav. Skersiniai geležinkelio kelio konstrukcijos profiliai: a) pylimas be apsauginio sluoksnio; b) pylimas su 0,5 m storio pobalastiniu sluoksniu; c) pylimas P160M160F120R120 su 0,4 m storio pobalastiniu sluoksniu; d) pylimas P160M160F120R120 su 0,5 m storio pobalastiniu sluoksniu; e) P160M160F120R120 pylimas su 0,6 m storio pobalastiniu sluoksniu; f) pylimas P230M230; g) pylimas P300; h) iškasa P160M160F120R120; i) iškasa P230; j) iškasa P300

Fig. 2.8. Cross-sections profiles of railway track construction: a) embankment without protective layer; b) embankment with a 0,5 m thickness protective layer; c) P160M160F120R120 embankment with a 0,4 m thickness protective layer; d) P160M160F120R120 embankment with a 0,5 m thickness protective layer; e) P160M160F120R120 embankment with a 0,6 m thickness protective layer; f) embankment P230M230; g) embankment P300; h) cutting P160M160F120R120; i) cutting P230; j) cutting P300



2.9 pav. Geležinkelio kelio konstrukcijos skersinio profilio P160M160F120R120 su 0,5 m storio pobalastiniu sluoksniu įrengto ant pylimo modeliai: a) Hodas *et al.* 2016; b) autoriaus

Fig. 2.9. Cross-section P160M160F120R120 with sub-ballast thickness 0.5 m model of railway track construction: a) Hodas *et al.* 2016; b) author

2.2 lentelė. Aplinkos oro ir vandens savybės

Table 2.2. Ambient air and water properties

Savybė	Reikšmė
Vandens šilumos laidumas, J/(diena·m·°C)	49 248
Ledo šilumos laidumas, J/(diena·m·°C)	194 400
Sauso oro šilumos laidumas, J/(diena·m·°C)	2073,6
Vandens garų šilumos laidumas, J/(diena·m·°C)	466 560
Vandens savitoji šiluminė talpa, J/(m ³ ·°C)	4 187 000
Ledo savitoji šiluminė talpa, J/(m ³ ·°C)	2 094 000
Oro savitoji šiluminė talpa, J/(m ³ ·°C)	1173,26
Vandens garų savitoji šiluminė talpa, J/(m ³ ·°C)	186
Vandens tankis, kg/ m ³	1000
Ledo tankis, kg/ m ³	920
Oro tankis, kg/ m ³	1,205

Pastaba: vandens agregatinės būsenos virsmo parametrai: kietos fazės virsmui skysta energijos tankis (angl. *Latent Heat Fusion of Water*), $L_f = 3,34 \cdot 10^8$ J/m³, skystos fazės virsmui į dujinę energijos tankis (angl. *Latent Heat of Vaporization of Water*), $L_v = 2,5 \cdot 10^9$ J/m³

Programos pakete „SV HEAT“, norint gauti temperatūros pasiskirstymą sluokniuose, reikalinga GKK sluoksnius sudarančių gruntų informacija pateikta 2.3 lentelėje. Programoje suprojektuotoje konstrukcijoje įterpti virtualūs termometrai (11....39), tam, kad gauti temperatūrų rezultatus konkrečiose vietose (2.8 pav., 2.9 pav. b).

2.3 lentelė. Geležinkelio kelio konstrukcijai panaudotų medžiagų savybės

Table 2.3. Properties of materials used for railway track construction

Savybės						
Šilumos laidis, J/(diena·m·°C)	Tankis, kg/ m ³	Vientiso kom- ponento specifinė šiluminė talpa, J/kg·°C	Vandens fazės kiti- mas nuo, °C	Vandens fazės kiti- mas iki, °C	Drėgmės kiekis, %	Pradinė tem- peratūra, °C
Naturalus gruntas						
103 680	1770	1582	– 0,01	– 0,5	0,157	7,3
Velėna(viršutinis dirvos sluoksnis)						
120 960	1800	1000	– 0,01	– 0,5	0,2	3
Sankasa						
129 945	2081	1585	– 0,01	– 0,5	0,175	6,29
Pobalastinis sluoksnis						
94 176	2130	1276	– 0,01	– 0,5	0,039	3,22
Balasto sluoksnis						
172 800	2198	1095	– 0,01	– 0,5	0,015	3

Vientisos medžiagos šilumos laidžio ir savitosios šiluminės talpos standartinės reikšmės pateiktos (LST EN ISO 13370:2000) atsižvelgiant į statybos techninio reglamento (STR.2.0... 2013) duomenis. Modeliavimo tikslesniems rezultatams gauti šilumo laidžio rodiklis buvo nustatytas laboratoriniais bandymais sluoksniams (2.10 pav.).



2.10 pav. Šilumos laidžio nustatymas: a) medžiagos ėminys, b) bandinio forma
Fig. 2.10. Thermal conductivity measuring: a) aggregate sample; b) sample form

Naudojant vientisos medžiagos standartinę šilumos laidžio reikšmę, neįvertinama konkrečios medžiagos šilumos laidis, oro tuštymų, bei drėgmės kiekis esantis sluoksniuose. Panaudojus eksperimentiniais tyrimais gautus GKK sluoksnių šilumos laidžius, gaunamas patikimesnis GKK modeliavimo rezultatas.

2.3. Važiuojančio traukinio sukeliamų geležinkelio kelio konstrukcijos deformacijų modeliavimas

GKK standumo koeficientas (K) yra veikiančios šią konstrukciją jėgos (q_a) ir vertikalios poslinkio (z), atsiradusio dėl jėgos poveikio santykis. Priklausomai nuo kokio pobūdžio jėga (statinė ar dinaminė) veikia, standumo koeficientas gali būti statinis arba dinaminis (Lichtberger 2011; Puzavac *et al.* 2012).

Vertikalios standumo koeficiento nustatymui naudojamas Huko dėsnis, kuris taikomas ir geležinkelio kelių sprendimo problematikoje (Gallego *et al.* 2011):

$$K = \frac{q_a}{z}, \quad (2.16)$$

čia K – vertikalus GKK standumo koeficientas, kN/m; z – didžiausias vertikalus GKK poslinkis, m.

Didelės GKK standumo koeficiento vertės rodo visos konstrukcijos tvirtumą, mažina didžiausius vertikalios poslinkius, atsirandančius dėl veikiamų apkrovų ir ilgina GKK eksploatavimo laiką. Didelės vertės taip pat gali padidinti dinamines apkrovas aširačio/bėgio ir pabėgio/BS sąveikos zonose, ko pasekoje sukeliamas spartesnis dilimas ir nuovarginis dėvėjimasis (Berggren 2009; Sanudo *et al.* 2016).

Pirmieji moksliniai geležinkelio kelio vertikaliųjų poslinkių tyrimų rezultatai buvo paskelbti dar Winkler 1860 metais. Kai geležinkelio kelias apibrėžiamas, kaip begalinio ilgio spindulio kreivė, kurio standumo koeficientas pastovus ($E \cdot I$) ir vienodai palaikomas per standumo elementus su žinomu BS koeficientu arba Winkler konstanta (C) (Nobili 2013), tuomet išraiška įvertinanti šiuos veiksniai:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4 z}{dx^4} + b \cdot K \cdot z(x) = q_a(x), \quad (2.17)$$

čia $q_a(x)$ – vertikali apkrova; b – atstumas tarp įtvirtinimų; C – Winkler konstanta; E – tampros modulis; I – inercijos momentas.

Vėliau mokslininkų patobulinta Winkler teorija: 1880 metais Zimmermann sukūrė nepastovios apkrovos modelį, kurį 1910 metais Timoshenko papildė elastiniais elementais ir išskaidė konstrukciją į skirtingus elementus (Nobili 2013):

$$z(x) = \frac{q_a \cdot d}{2 \cdot F \cdot K} \cdot \frac{1}{L} \cdot e^{-\frac{x}{L}} \cdot \cos\left(\frac{x}{L}\right) + \sin\left(\frac{x}{L}\right), \quad (2.18)$$

čia L – geležinkelio kelio ilgis; d – atstumas tarp pabėgių; F – pabėgio ir BS sąveikos plotas.

Geležinkelio kelio ilgis, kuriame veikia apkrova, išreiškiamas formule (Nobili 2013):

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I \cdot d}{F \cdot K}}. \quad (2.19)$$

Panaudojus geležinkelio kelio ilgio išraišką (2.19) vertikalieji poslinkiai gali būti apskaičiuojami jėgos veikimo taške iš lygties:

$$z(x) = \frac{q_a \cdot d}{2 \cdot F \cdot K} \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I \cdot d}{F \cdot K}}. \quad (2.20)$$

Naudojant šią išraišką BS koeficientas K yra kompleksinis dydis, kuris yra visos GKK konstrukcijos standumo koeficientas. Zimmermann formuluotėje BS storis nėra įvertinamas, todėl šio koeficiento nustatytas reikšmės, priklausomai nuo GKK storio, pateikia Giner, Lopez Pita (2009) atlikti tyrimai.

Vertikali dinaminė jėga ($F(t)$) yra nuo laiko priklausanti išorinė jėga, kuri apima inercinę, slopinimo ir elastines jėgas, veikiančias kūną (Gu, Choi 2013):

$$\{F(t)\} = [M]\{\ddot{d}(t)\} + [C]\{\dot{d}(t)\} + [K]\{d(t)\}, \quad (2.21)$$

čia $[M]$ – masių matrica; $[C]$ – slopinimo matrica; $[K]$ – standumo matrica; $\{F(t)\}$ – dinaminė jėga priklausanti nuo laiko; $\{\ddot{d}(t)\}$ – pagreitis; $\{\dot{d}(t)\}$ – greitis; $\{d(t)\}$ – poslinkis.

Dinaminė jėga gali būti konvertuota į vienetinę kvazistatinę jėgą (F_{kvazi}), kai i-ajame taške didžiausias poslinkis (d) laiko momentu ($t = t_{(i)max}$) (Gu, Choi 2013):

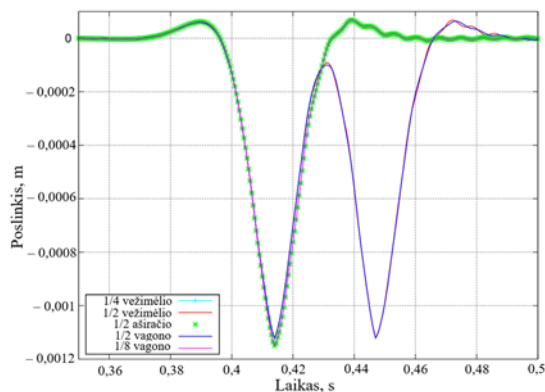
$$\{F_{kvazi}(t_{(i)max})\} = [K]\{d(t_{(i)max})\} = [M]\{\ddot{d}(t_{(i)max})\} + [C]\{\dot{d}(t_{(i)max})\} - \{F(t_{(i)max})\} \quad (2.22)$$

Iš 2.22 lygties didžiausia kvazistatinė jėga i-ajame taške esant didžiausiam vertikaliam poslinkiui, kai $d(t) = 0$ gali būti išreiškiama (Gu, Choi 2013):

$$F_{kvazi(i)max} = [K_{(i)}]\{d_{(i)max}\}, \quad (2.23)$$

čia $[K_{(i)}]$ – i-oji eilutė standumo matricoje $[K]$ ir $\{d_{(i)max}\}$ – i-ojo taško didžiausias vertikalusis poslinkis.

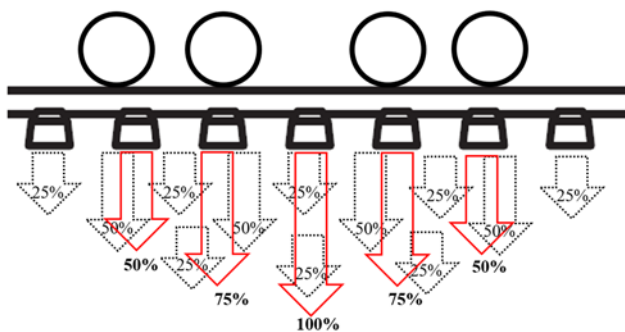
Šis supaprastinimas leidžia standumo koeficientą ($[K_{(i)}]$) naudoti skaitiškai sumodeliuotą net iš tiesinių sistemų. $F_{kvazi(i)max}$ ir $d_{(i)max}$ gali būti nustatomi iš lauko eksperimentinių bandymų ar skaitinių modelių. Taigi standumo reikšmė tiesiogiai priklauso nuo dinaminės jėgos. Be to, naudojant šį metodą eliminuojama dinaminių modelių (dinaminės jėgos) trūkumas, t. y. dėl geležinkelio kelio komponentų (bėgių, pabėgių, padų) ir riedmenų mechaninių, fizinių, sąveikos zonos ir formos netolygumo. Taip pat riedmenų greitis tampa tik sąlyginis veiksnys, kuris turi įtakos apkrovos veikimo laikui į tam tikrą konstrukcijos dalį (Gu, Choi 2013). Nguyen *et al.* (2011) atliktas tyrimas patvirtina, kad riedmenų modelis, neturi įtakos didžiausiems vertikaliems poslinkiams (2.11 pav.).



2.11 pav. Poslinkiai gauti skirtingais riedmenų modeliais kai greitis 360 km/h (Nguyen *et al.* 2011)

Fig. 2.11. Displacement of a point rail for different vehicle models at speed 360 km/h (Nguyen *et al.* 2011)

Pritaikius Awoleye *et al.* (1993) apkrovų išskirtymo modelį į GKK suformuotas teorinis ašies apkrovų pasiskirstymo modelis (2.12 pav.), vertinti didžiausius vertikalios poslinkius.

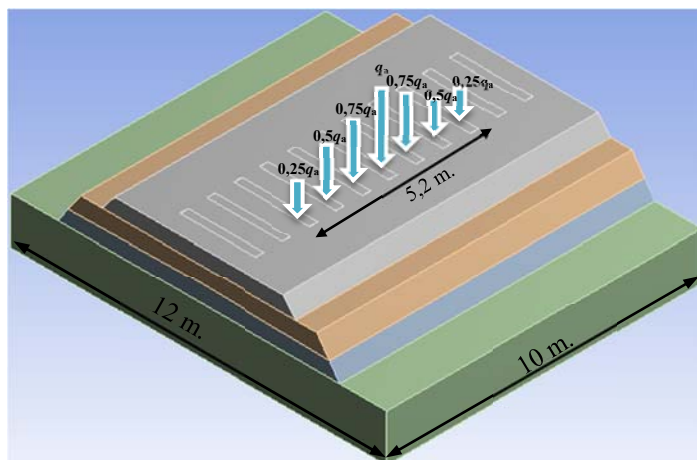


2.12 pav. Ašies apkrovų pasiskirstymas į geležinkelio kelio konstrukciją

Fig. 2.12. Axle load distribution to railway track construction model

Skaiciavimams optimizuoti (nes įprastiniu būdu vienos situacijos modeliavimas užimtų daug kompiuterinių ir laiko resursų) buvo pasirinkta išskaidyta didžiausios jėgos koncentracija (2.12 pav.), stebima dviejų vagonų sukabinimo vietoje, kada veikia 4 arba daugiau aširačių jėga. Aširačio didžiausia apkrova buvo pasirinkta šiuo metu viena iš sunkiausių riedmenų esančių Lietuvoje ($q_a = 225$ kN). Tiksliesniems rezultatams gauti riedmenų sukuriama apkrova, veikianti į GKK buvo išskaidyta, remiantis taikomomis metodikomis (Awoleye *et al.* 1993;

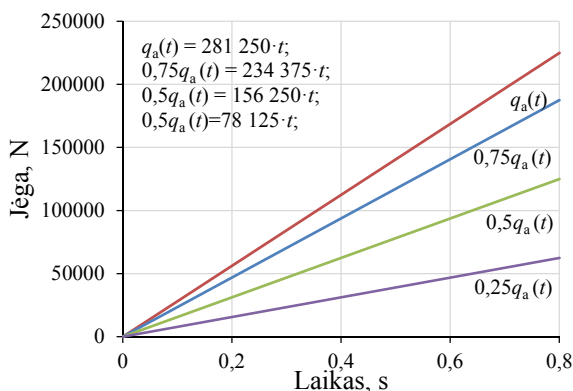
Klotzinger 2008^b; Selig, Waters 1994). Jėgos dydžiai ir veikimo vietos pateikta 2.13 paveiksle.



2.13 pav. Geležinkelio kelio konstrukcijos modelis ANSYS programoje
Fig. 2.13. Railway track construction model in ANSYS program

Rezultatams gauti buvo modeliuojamos AOT nuo minus 30 °C iki plus 30 °C. Apkrovos veikimo laikas buvo pasirinktas 0,8 s (2.14 pav.), tai atitinka mažiausią riedmenų greitį (25 km/h), t. y. ilgiausias laikas kiek gali veikti riedmenų sukuriamą apkrova į GKK. Apkrovos veikimo laikas pasirinktas atsižvelgiant į pirmame skyriuje aptartą tyrimą (Sadegh, Youldashkhan 2005).

Remiantis Pandolf teorija (Burrow *et al.* 2007), norint gauti tikslius rezultatus reikalaujama GKK modeliuose, naudoti mažiausiai 9 pabėgių ilgio kada siekiama gauti vertikalios poslinkius. Gauti GKK didžiausiems poslinkiams sudaryti trys skaitiniai modeliai, kurių kiekvieną sudaro 11 pabėgių ilgio konstrukcija, kurios plotis 12 m ir ilgis 10 m GKK modeliuose skirias tik PBS storis, nes buvo imami skirtingi. GKK skersinio profilio aukštis 2,95 m, kai PBS storis 0,4 m, kai PBS 0,5 m – 3,05 m, o kai 0,6 m – 3,15 m. Modeliavimo rezultatų patikimumui buvo eliminuota bėgiai, pabėgiai ir kiti elementai, kurie jungia šiuos komponentus – naudojama tik pabėgių plotas į kuriuos veikia riedmenų sukuriamą apkrova, taip gaunamas slėgimas į GKK.



2.14 pav. Išskaidytų jėgų veikimo laikas
Fig. 2.14. Time of affecting distributed forces

Modeliavimo rezultatams gauti GKK buvo pasirinkta vieno kelio, kai naudojami UIC 60 gelžbetoniniai pabėgiai (pabėgio apatinės dalies sąveikaujančios su BS plotas $0,6214 \text{ m}^2$, atstumas tarp pabėgių $0,6 \text{ m}$).

2.4. Geležinkelio kelio konstrukcijos sluoksnių tampros moduliai

Žilinos universitete esantis lauko eksperimentinis stendas DRETM II (2.3 pav.), kurio geometriniai parametrai panašūs, o sluoksnių storiai ir medžiagos yra tokios pat, kaip ir skaitiniame modelyje buvo panaudotas sluoksnių sudėties nustatymui. BS įrengtas iš granito skaldos $0/63 \text{ mm}$, PBS – KG1 iš MMM $0/32 \text{ mm}$, sankasos sluoksnis – smėlio ir žvyro mišinio $0/63 \text{ mm}$, natūralaus grunto sluoksnis – priemolių ir priemlių. Naudojant šį eksperimentinį stendą, buvo nustatyta GKK atskirų konstrukcinių sluoksnių sudedamųjų dalių procentinės sudėtys (2.4 lentelė).

2.4 lentelė. Geležinkelio kelio konstrukcijos sluoksnių procentinės sudėtys
Table 2.4. Composition of railway track construction layers in percentages

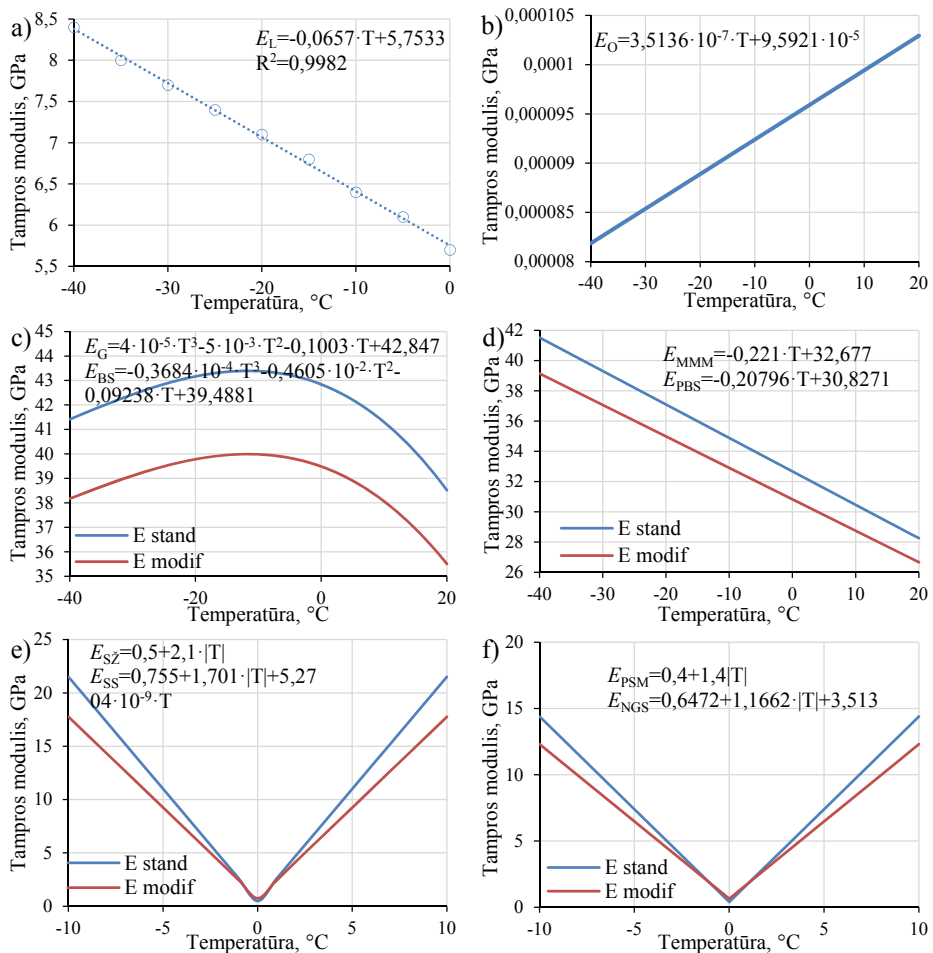
Sluoksnis	Sluoksnio sudėtis, %		
	Oras	Vanduo	Konstrukcinė medžiaga
Balasto sluoksnis	6,6	1,4	92,0
Pobalastinis sluoksnis	2,0	3,9	94,1
Sankasos sluoksnis	1,5	17,5	81,0
Natūralaus grunto sluoksnis	1,0	15,7	83,3

Standartiniuose ir norminiuose projektavimo dokumentuose pateikiama vienalyčių medžiagų tampros moduliai. Remiantis gautomis GKK sluoksnių sudėtimis (2.4 lentelė) ir kitų mokslininkų iki šiol atliktais medžiagų, skirtų įrengti GKK sluoksnius, tampros modulių priklausomybių nuo temperatūros rezultatais suformuotos GKK atskirų sluoksnių teorinės tampros modulių (E) priklausomybės nuo temperatūros (t) (2.5 lentelė). Gautas GKK atskirų sluoksnių teorinės tampros modulių priklausomybės nuo temperatūros (2.15 pav. c, d, e, f), rodo, kad tampros modulių reikšmės sumažėja (E_{stand} – konstrukcinės medžiagos tampros modulis, E_{modif} – sluoksnio tampros modulis).

2.5 lentelė. Medžiagų ir geležinkelio kelio konstrukcijos sluoksnių tampros modulių priklausomybės nuo temperatūros

Table 2.5. Elasticity modules dependence on temperatures of materials and railway track constructions layers

Medžiaga	Vienalytės medžiagos tampros modulio priklausomybė	Mokslininkai	Sluoksnio pavadinimas	Konstrukcinio sluoksnio tampros modulio išraiška
Oras	$E_O = 3,5136 \cdot 10^{-7} \cdot T + 9,5921 \cdot 10^{-5}$	Howard, Angus 2009	BS ir PBS esančio vandens ir oro	$E_{O+v} = 1,6709 + 5,7819 \cdot 10^{-8} \cdot T$
Ledas	$E_L = -0,0657 \cdot T + 5,7533$	Berdnikov 1955; Bragov <i>et al.</i> 2015; Gold 1958, 1994; Gold, Traetteberg 1975; Gold <i>et al.</i> 1992	Sankasos sl. vandens ir oro	$E_{O+v} = 1,8421 + 2,7739 \cdot 10^{-8} \cdot T$
			Natūraliame sl. vandens ir oro	$E_{O+v} = 1,8803 + 2,104 \cdot 10^{-8} \cdot T$
Granitas	$E_G = 4 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 5 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 0,1003 \cdot T + 42,847$	Li <i>et al.</i> 2016; Shao <i>et al.</i> 2013	Balasto	$E_{BS} = -0,3684 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 - 0,4605 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 - 0,09238 \cdot T + 39,4881$
MMM	$E_{MMM} = -0,221 \cdot T + 32,677$	Li <i>et al.</i> 2016; Shao <i>et al.</i> 2013; Tsyto- vich 1973	Pobalastinis	$E_{PBS} = -0,20796 \cdot T + 30,8271$
Smėlis ir žvyras	$E_{Sž} = 0,5 + 2,1 \cdot T $	Tsyto- vich 1973; Voty- kov 1958; Sa- dovsky 1967; Vorobiov 1973; Prazdni- kova 1982; Shusherina <i>et al.</i> 1982	Sankasa	$E_{SS} = 0,755 + 1,701 \cdot T + 5,2704 \cdot 10^{-9} \cdot T$
Priemo- lis, priesmė- lis	$E_{PSM} = 0,4 + 1,4 \cdot T $		Natūralaus grunto	$E_{NGS} = 0,6472 + 1,1662 \cdot T + 3,5136 \cdot 10^{-9} \cdot T$



2.15 pav. Skirtingų medžiagų tampros modulių nuo temperatūros priklausomybės:

a) ledo/vandens; b) oro; c) granito/balasto sluoksniu; d) mineralinių medžiagų mišinio(KG1)/pobalastinio sluoksniu; e) smėlio ir žvyro mišinio/sankasos sluoksniu; d) priemolių ir priemolių/natūralaus grunto sluoksniu

Fig. 2.15. Elasticity modulus of different materials: a) ice/water; b) air; c) granite/ballast layer; d) mineral aggregate mixture (KG1)/sub-ballast layer; e) sand and gravel mixture/subgrade layer; f) sandy loam and sandy clay/natural ground layer

Vandens tampros modulio (E_L) priklausomybė buvo gauta ieškant iš Berdenikov (1955), Bragov *et al.* (2015), Gold (1958, 1994), Gold, Traetteberg (1975), Gold *et al.* (1992) atliktų tyrimų rezultatų ieškant regresijos lygties, kuri rodytų

nepertraukiamą priklausomybę (2.15 pav. a). Taip pat suformuotos pagal procentinį kiekį esančio vandens (E_L) (2.15 pav. a) ir oro (E_O) (2.15 pav. b) mišinio tamproso modulių priklausomybės (2.5 lentelė).

Iš (2.15 pav. c, d, e, f) pateiktų GKK įrengti naudojamų biriųjų medžiagų ir konstrukcinių sluoksnių tamproso modulių priklausomybių, matyti, kad konstrukciniuose sluoksniuose esantis atitinkamas kiekis vandens ir oro mažina tamproso modulius. Panaudojus granito skaldą įrengti BS tamproso modulis sumažėja apie 3 GPa, PBS tamproso modulis sumažėja apie 2 GPa, kai naudojamas MMM, atitinkantis KG1 normines specifikacijas. Sankasos sluoksnio, įrengto iš smėlio/žvyro mišinio ir natūralaus grunto sluoksnio, kurį sudaro priesmėliai ir priemoliai, tamproso moduliai esant 0 °C ar artimai temperatūrai pasižymi artimomis tamproso modulių reikšmėmis kaip ir įrengti naudojamų medžiagų. Kintant temperatūrai nuo minus 5 °C iki minus 10 °C ir nuo plus 5 °C iki plus 10 °C sankasos ir natūralaus grunto sluoksnių tamproso moduliai įgyja didesnę skirtumą, lyginant su jiems įrengti naudojamų medžiagų. Didžiausias tamproso modulių skirtumas gaunamas, kai temperatūra plus/minus 10 °C, atitinkamai sankasos sluoksnio – 5 GPa, natūralaus grunto sluoksnio – 3 GPa.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. BS pasirinkta ištirti kokybiniai granito skaldos rodikliai (granuliometrinė sudėtis, tankis (DEN_p), įmirkis (WA_{24}), mikro-Devalio rodiklis (M_{DE}), atsparumas trupinimui (SZ_{RB}), Los Andželo rodiklis (LA_{RB})) ir PBS skirtu MMM (KG1) fizinės ir mechaninės savybės (granuliometrinė sudėtis, mišinio tankis (ρ) ir pralaidumas vandeniui (k)).
2. Granuliometrinės sudėties sklaidai vertinti pasiūlyta naudoti iš regresijos lygties gautą didžiausią pilnutinės išbiros per sietus standartinį nuokrypį, kuris įprastai būna to dydžio grūdelių, kurie mišinyje sudaro 50–70 % jo masės. Ši didžiausia standartinio nuokrypio reikšmė leidžia palyginti skirtingo stambumo ir nevienodumo (homogeniškumo) biriąsias medžiagas. Šis būdas leidžia vienu skaičiumi (didžiausiu standartiniu nuokrypiu) įvertinti bet kurio biraus mišinio granuliometrinės sudėties variacijos dydumą.
3. BS ir PBS rengti skirtų biriųjų medžiagų savybių pasiskirstymo normališkumo tikrinimui taikomi asimetrijos (SKEW) ir eksceso (KURT) koeficientai, Kolmogorov-Smirnov (KS), Shapiro-Wilk (SW), Pearson (χ^2) kriterijai. Šių savybių atitikimas normaliajam skirstiniui leidžia vertinti biriųjų medžiagų kokybės rodiklių variaciją taikant įprastinius matematinės statistikos kriterijus (KV ir Bartleto).

4. Sudaryti skirtingų skersinių profilių GKK modeliai „SV HEAT“ programiniame pakete, naudojant Lietuvos hidrometeorologijos AOT ir sniegos dangos storio duomenis ir konstrukcinių medžiagų fizines ir mechanines savybes, tiksliau įvertina neigiamų AOT poveikį GKK hidroterminiams režimams, nei sudaryti valstybių unifikuoti šalčio zonų žemėlapiai.
5. Dinaminė jėga konvertuota į kvazistatinę jėgą (F_{kvtzi}) leidžia standumo koeficientą [$K_{(i)}$] naudoti skaitiškai sumodeliuotą iš tiesinių sistemų. Naudojant šį metodą didžiausi geležinkelio kelio vertikalūs poslinkiai nepakinta, o uždavinio sprendimo laikas ženkliai sutrumpėja. Sprendžiant didžiausių vertikalųjų poslinkių nustatymo uždavinį eliminuojama geležinkelio kelio komponentų (bėgių, pabėgių, padų) ir riedmenų mechaninių, fizinių, sąveikos zonos ir formos netolygumo veiksniai. Riedmenų greitis tampa tik sąlyginis, kuris turi įtakos tik kiek laiko veikia apkrova aširačiui veikiant tam tikrą konstrukcijos dalį.
6. Įvertinus GKK sudarančių sluoksnių procentinę sudėtį: oro tuštymų, vandens ir konstrukcinės medžiagos/mišinio, sudarytos sluoksnių teorinės tampros modulių priklausomybės nuo AOT. BS įrengto iš granito skaldos tampros modulis sumažėja apie 3 GPa, lyginant su granito skaldos žaliava, PBS tampros modulis sumažėja apie 2 GPa, kai naudojamas MMM (KG1). Sankasos sluoksnio, įrengto iš smėlio/ žvyro mišinio ir natūralaus grunto sluoksnio, kurį sudaro priesmėliai ir priemoliai, tampros moduliai esant 0 °C ar artimai temperatūrai pasižymi panašiomis šiuos sluoksnius sudarančių medžiagų tampros modulių reikšmėmis.

Geležinkelio kelio konstrukcijos medžiagų ir sluoksnių eksperimentiniai tyrimai

Šiame skyriuje apibūdintos projektinės ir faktinės GKK. Ištirta šių konstrukcijų PBS, įrengto iš MMM (KG1) ir BS, įrengto iš granitinės skaldos granulimetrinės sudėties, tankiai (DEN_P), atsparumas smūgiams (SZ_{RB}), trupinimui (LA_{RB}), dėvėjimuisi (M_{DE}), įmirkiai (WA_{24}) bei jų kaita skirtingais technologinio proceso etapais. Pateikta kokybinių rodiklių statistiniai parametrai, histogramos, normaliojo skirstinio teorinės kreivės. Remiantis atliktais lauko eksperimentiniais tyrimais, kurių metu išmatuota GKK sluoksnių temperatūros ir drėgmės kaita, priklausanti nuo aplinkos oro veiksmų, sumodeliuota skirtingų profilių GKK temperatūrų kaita kritinių AOT laikotarpiais. Nustatyta GKK standumo priklausomybė nuo AOT.

Skyriaus tematika paskelbtos keturios publikacijos (Navikas, Sivilevičius 2015; Navikas *et al.* 2016; Navikas, Sivilevičius 2017^a; Navikas, Sivilevičius 2017^b).

3.1. Pobalastinio sluoksnio mineralinio medžiagų mišinio savybių statistinis tyrimas

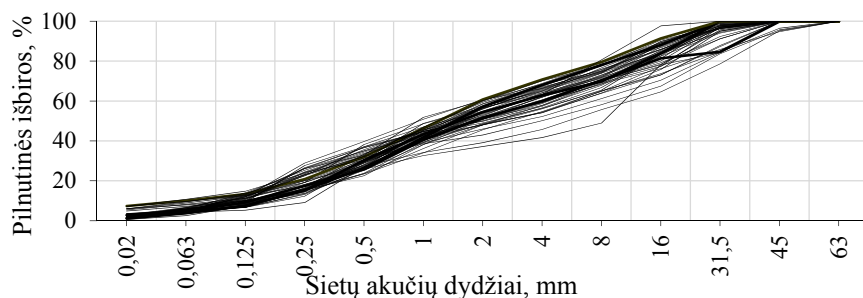
Šiame poskyryje MMM (KG1) savybėms nustatyti, bendradarbiaujant su įmone AB „Problematika“, buvo gauti 2014 metais buvo paimtų ėminių iš dviejų skirtingų technologinio proceso vietų: pirmos krūvos ir suformuoto PBS (2.2 pav.). 3.1 lentelėje pateiktas bandinių skaičius, kuriems buvo nustatytos trys savybės. Visi atskirieji ėminiai buvo ištirti AB „Problematika“ laboratorijoje standartiniais metodais. Kiekvienai MMM savybei nustatyti padėties (aritmetinis vidurkis) ir sklaidos (standartinis nuokrypis) parametrai. Nubraižytos histogramos ir normaliojo skirstinio teorinės kreivės. Patikrinta duomenų pasiskirstymo atitiktis normaliniam (Gauso) dėsnui.

3.1 lentelė. Mineralinių medžiagų mišinio bandinių skaičius skirtingais technologinio proceso etapais

Table 3.1. Number of mineral aggregate mixture samples from different technological process areas

Ėminių ėmimo vieta	Savybėms nustatyti bandinių skaičius		
	Granulimetrinė sudėtis p_i , %	Mišinio tankis ρ , Mg/m^3	Vandens pralaidumas, k , m/s
SK	14	14	14
GKK	35	35	35
Iš viso	49	49	49

Nustačius MMM visų atskirų ėminių ($n = 49$), imtų iš skirtingų vietų, granulimetrinę sudėtį gauti jo sklaidos rezultatai (3.1 pav.).

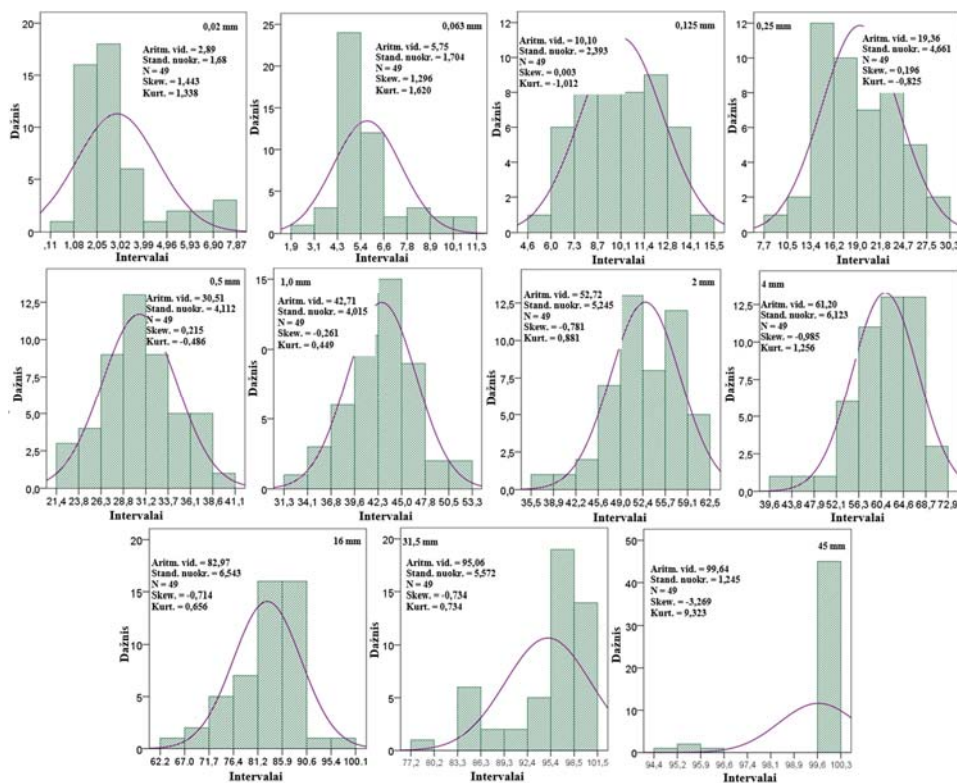


3.1 pav. Mineralinių medžiagų mišinio atskirų bandinių granulimetrinė sudėtis

Fig. 3.1. Gradation of mineral aggregate mixture layer single samples

Imant iš MMM granulimetrinės sudėties aritmetinių vidurkių kreivės dalelių skersmenis, atitinkančius 10 %, 30 % ir 60 % pilnutinių išbyrų per sietus, gaunama $d_{10} = 0,125\text{mm}$, $d_{30} = 0,5\text{mm}$ ir $d_{60} = 4\text{mm}$, $C_c = 0,5$. Skaičiavimo rezultatai rodo, kad pobalastinio sluoksnio MMM pagal vienodumo koeficiento reikšmę (C_u) yra geros (G) sanklodos gruntas ($32 \geq 6$), o pagal sanklodos rodiklio (C_c) reikšmę ($0,5 < 1$), jis yra įvairios (P) sanklodos gruntas (2.1 lentelė).

MMM ėminių granulimetrinės sudėties pakankamai platus kreivių sklaidos laukas (3.1 pav.) rodo, kad PBS medžiaga yra nehomogeniška. Pilnutinių išbyrų per visus laboratorinius sietus pasiskirstymo histogramas, normaliojo skirstinio teorinės kreivės ir apskaičiuotieji padėties ir sklaidos statistiniai parametrai (3.2 pav.) skiriasi.



3.2 pav. Pobalastinio sluoksnio normaliojo skirstinio teorinės kreivės, histogramos ir statistiniai rodikliai

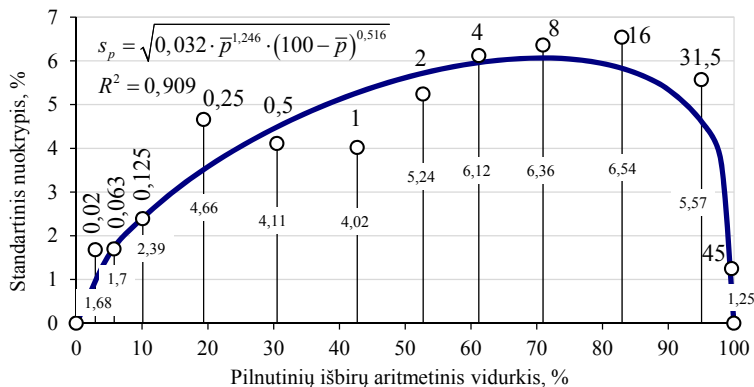
Fig. 3.2. The sub-ballast percent passing histograms, normal distribution theoretical curves and statistical indicators

Smulkiosios (nuo 0,02 mm iki 0,063 mm) dalelės turi teigiamą (dešinės pusės) asimetriją, nes jų dauguma patenka į kairėje nuo aritmetinio vidurkio esančius histogramos intervalus (klases).

Išbyrėjusios per sietus nuo 0,125 mm iki 2 mm dalelės turi simetrinį artimą normaliniam skirstinį. Dalelės, kurių dydis yra nuo 4 mm iki 45 mm, turi neigiamą (kairės pusės) asimetriją, nes jų kiekiai MMM pasiskirstę dešinėje pusėje – didžioji dalis reikšmių yra aritmetinio vidurkio dešinėje pusėje.

3.2 lentelė. Mineralinių medžiagų mišinio granuliometrinės sudėties pasiskirstymas
Table 3.2. Mineral aggregate mixture for sub-ballast gradation distribution

Statistinis rodiklis, %	Pilnutinės išbiros per sietus, mm											
	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	45
Aritm. vid.	2,89	5,75	10,10	19,36	30,51	42,71	52,72	61,20	70,96	82,97	95,06	99,64
Stand. nuok.	1,68	1,70	2,39	4,66	4,11	4,02	5,25	6,12	6,36	6,54	5,57	1,25
Var. koef.	58,1	29,6	23,7	24,1	13,5	9,4	10,0	10,0	9,0	7,9	5,9	1,3



3.3 pav. Granuliometrinės sudėties variacijos (s_p) ir pozicijos rodiklio (\bar{p}) koreliacija su homogeniškumo lygtimi

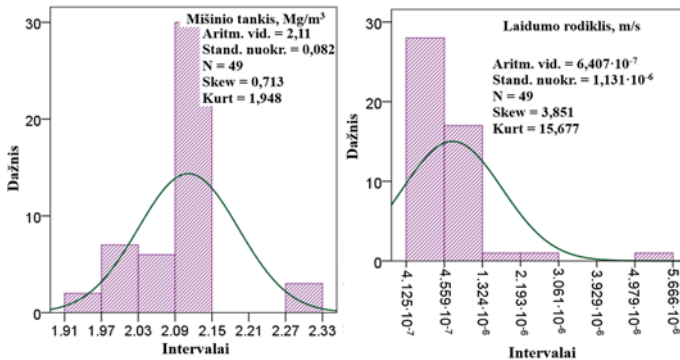
Fig. 3.3. Correlation between the parameters of sub-ballast material gradation variation (s_p) and position (\bar{p}) with equation of homogeneity

Pagal matematinį modelį (2.3) iš 3.2 lentelėje pateiktų aritmetinių vidurkių (\bar{p}) ir standartinių nuokrypių (s_p) gauta šių statistinių rodiklių sieties regresijos

lygtis $s_p = f(\bar{p})$ ir jos determinacijos koeficientas $R^2 = 0,909$ (3.3 pav.), rodantis, kad s_p kitimas apie 91 % nulemtas \bar{p} kitimo ir tik 9 % s_p kitimo priklauso nuo kitų modelyje nevertinamų parametrų.

MMM tinkamumą geležinkelio PBS rengti (tiesti) rodo ne tik jo granulimetrinė sudėtis, bet ir MMM tankis bei pralaidumas vandeniui. PBS skirstomas į menko pralaidumo (KG1) ir padidinto pralaidumo (KG2) (Apsauginio... 2013).

Geležinkelio PBS skirtu rengti MMM (KG1) 49 atskirų ėminių tankio vidurkis yra $2,112 \text{ Mg/m}^3$ (2112 kg/m^3) (3.4 pav.).



3.4 pav. Mineralinių medžiagų mišinio (KG1) skirtu pobalastiniam sluoksniui tankio ir pralaidumo vandeniui histogramos, normaliojo skirstinio teorinės kreivės ir statistiniai rodikliai

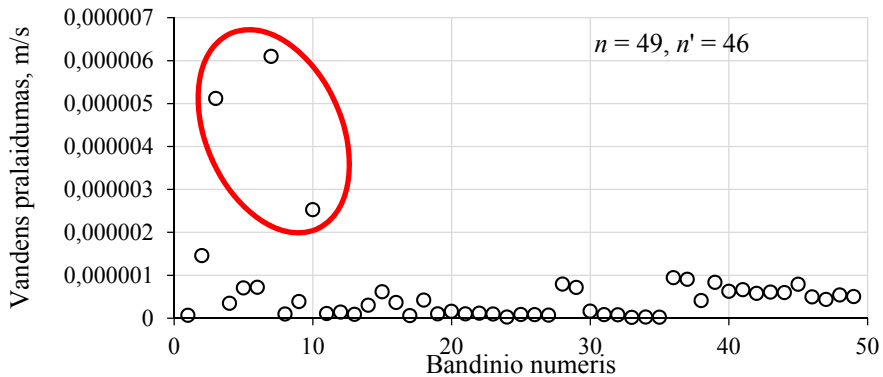
Fig. 3.4. Mineral aggregate mixture (KG1) of sub-ballast layer density and water permeability histograms, normal distribution curves and statistical indicators

Pralaidumo vandeniui rodiklio vidurkis $0,6407 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$. Iš gautų duomenų matyti, kad MMM tankis išsibarstęs siauroje srityje (variacijos koeficientas $v = 3,9\%$), o pralaidumas vandeniui labai plačioje srityje ($v = 176,3\%$). MMM pralaidumo vandeniui rezultatai turi išskirčių (3.5 pav.).

Atmetus tris išskirtis, esančias už $\pm 3s_k$ ribų, apskaičiuoti statistiniai parametrai ir nubraižyta nauja histograma (3.6 pav.). Jie rodo, kad vandens pralaidumo aritmetinis vidurkis sumažėjo apie du kartus (nuo $6,41 \cdot 10^{-7}$ iki $3,65 \cdot 10^{-7}$), o standartinis nuokrypis sumažėjo 3,4 karto (nuo $1,13 \cdot 10^{-6}$ iki $3,31 \cdot 10^{-7}$).

Skaiciuojant MMM mažiausią reprezentatyvios imties didumą pralaidumo vandeniui naudojami 3.6 pav. gauti duomenys.

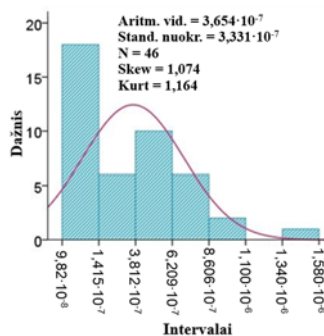
Pagal skirtingus kriterijus gautos normaliojo skirstinio atitiktys pateiktos 3.3 lentelėje. Empirinių (eksperimentinių) duomenų skirstinių atitikties normaliniam skirstiniui tikrinimo rezultatai (3.3 lentelė) rodo, kad pagal penkis kriterijus dauguma MMM (KG1) savybių tenkina normaliojo skirstinio reikalavimus (3.3 lentelė, „+“ ženklų pažymėta).



3.5 pav. Mineralinių medžiagų mišinio (KG1) pralaidumo vandeniui bandinių taškinė diagrama su išskirtimis

Fig. 3.5. Water permeability of mineral aggregate mixture scatterplot with outliers

Atsižvelgiant į granulimetrinei sudėčiai (3.1 pav.) paimtą ėminių skaičių ($n = 49$), pateiktos standartinių nuokrypių reikšmės SKEW (s_{sk}) ir KURT (s_{ku}), apskaičiuotos naudojantis (Sivilevičius, Vansauskas 2013). Apskaičiuota SKEW reikšmė, padauginta iš 3, kuri lygi 1,699. Ji yra didesnė už visas apskaičiuotąsias s_{sk} reikšmes, išskyrus 45 mm sietą (3.3 lentelė). Apskaičiuotoji KURT standartinio nuokrypio (s_{ku}) reikšmė, padauginta iš 5 – 3,340, taip pat yra didesnė už apskaičiuotąsias reikšmes bandymo duomenų, išskyrus 45 mm sietą (3.3 lentelė).



3.6 pav. Pralaidumo vandeniui be išskirčių histograma ir statistiniai rodikliai

Fig. 3.6 Water permeability histogram and statistical indicators without outliers

Atsižvelgiant ir į KS, SW bei χ^2 , metodų gautus duomenis, pagrįstai galima teigti, kad duomenys yra pasiskirstę pagal normalųjį (Gauso) dėsnį.

Geležinkelio PBS skirtu rengti MMM procentinių išbyrų per kontrolinius sietus aritmetiniai vidurkiai pakinta (3.6 pav.) jį kraunant ir transportuojant. Dėl mechaninių poveikių medžiaga smulkėja. Lyginant MMM (KG1) ėminius, paimtus iš sandėliavimo krūvos (SK) ir iš sluoksnio (GKK), matyti, kad iš SK paimtų ėminių frakcijų nuo 2 mm iki 31,5 mm aritmetiniai vidurkiai buvo didesni nei iš GKK sluoksnio, o frakcijų nuo 0,02 mm iki 1 mm priešingai – didesni vidurkiai, ėminių paimtų iš GKK sluoksnio.

3.3 lentelė. Gautų duomenų pasiskirstymo atitikimas normaliojo skirstinio reikalavimams

Table 3.3. Got results compliance to normal distribution

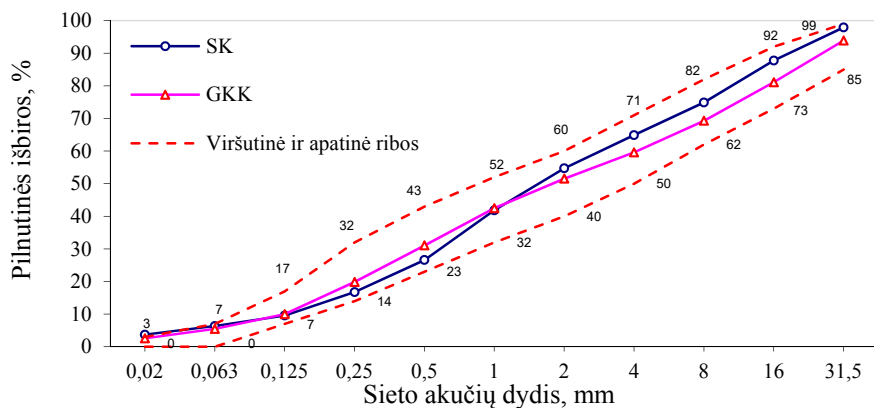
Rodikliai		Normaliojo skirstinio patikros metodai									
		SKEW	Išv.	KURT	Išv.	KS	Išv.	SW	Išv.	χ^2	Išv.
Sietų akučių dydžiai	0,02	1,443	–	1,338	+	0,000	+	0,000	+	60,5	+
	0,063	1,296	–	1,620	+	0,000	+	0,000	+	63,4	+
	0,125	0,003	+	– 1,012	+	0,200	+	0,246	+	15,5	+
	0,25	0,196	+	– 0,852	+	0,057	+	0,138	+	25,6	+
	0,5	0,215	+	– 0,486	+	0,200	–	0,729	+	20,4	+
	1	– 0,261	+	0,449	+	0,200	–	0,703	+	37,7	+
	2	– 0,781	+	0,981	+	0,200	–	0,046	+	61,5	+
	4	– 0,985	+	1,256	+	0,091	+	0,019	+	38,1	+
	8	– 1,177	–	2,108	+	0,069	+	0,005	+	42,9	+
	16	– 0,714	+	0,656	+	0,012	+	0,057	+	48,5	+
	31,5	– 0,734	+	0,734	+	0,000	+	0,000	+	37,7	+
	45	– 3,269	–	9,323	–	0,000	+	0,000	+	282,6	–
Tankis		0,713	+	1,948	+	0,000	+	0,000	+	140,6	–
Pralaidumo rodiklis		3,851	–	15,677	–	0,000	+	0,000	+	126,8	–

Pastaba: Normaliojo pasiskirstymo tikrinimo kritinės reikšmės, naudojant skirtingus metodus: tris kartus SKEW standartinis nuokrypis – $3s_{sk} = 1,699$; penkis kartus KURT standartinis nuokrypis – $5s_{ku} = 3,340$; KS – $d_{0,05} = 0,194$; SW – $w_c = 0,947$; Pearson – $\chi^2_{0,05} = 65,2$

Smulkiųjų frakcijų (iki 2 mm) didesnės pilnutinių išbirų reikšmės, gautos KG1 mišinio ėminių, paimtų iš GKK sluoksnio, rodo, kad krovimo ir transportavimo technologinio proceso metu mišinys turi tendenciją smulkėti. Susmulkėjusio MMM (KG1) vidutinė granulimetrinė sudėtis tenkino DIN – Taschenbuch 113

(1998) techninius reikalavimus, nes jos laužtė (kreivė) buvo tarp viršutinės (p_u) ir apatinės (p_L) ribų (3.7 pav.).

Nors pilnutinių išbirų procentiniai vidurkiai ir tenkina techninius reikalavimus, bet dėl atskirų ėminių granulimetrinės sudėties didelės variacijos, dalis MMM šių reikalavimų netenkina (3.8 pav.) ir gali būti laikoma broku. KG1 MMM granulimetrinei sudėčiai nėra nustatytos statistinės tolerancijos, rodančios, kiek daugiausiai gali nukrypti vieno atskiro ėminio granulimetrinės sudėties nuo projekcinės vertės (angl. JMF – *job-mix formula*).

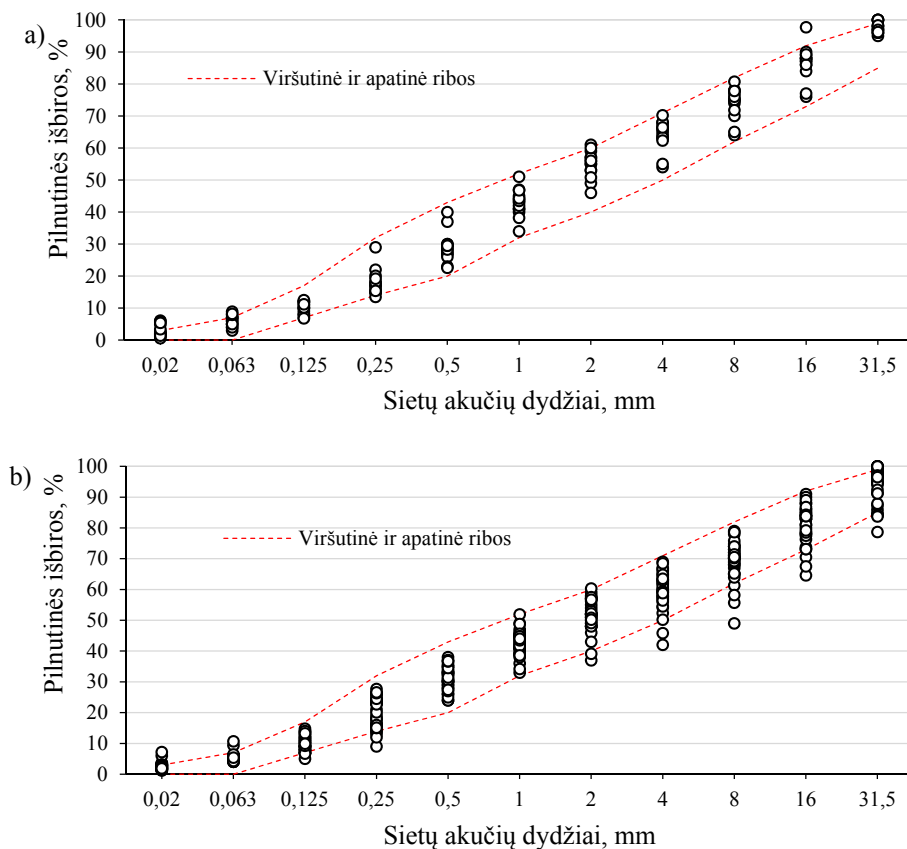


3.7 pav. Geležinkelio pobalastiniam sluoksniui skirto mineralinių medžiagų mišinio (KG1) skirtingose vietose paimtų ėminių aritmetinių vidurkių atitiktis technologiniams reikalavimams

Fig. 3.7. Railway sub-ballast layer mineral aggregate mixture (KG1) of different locations of specimens arithmetic means match to the technological requirements

Atskirų ėminių, paimtų iš krūvos (3.8 pav. a), sklaidos lauko plotis buvo mažesnis už ėminių, paimtų iš sluoksnio (3.8 pav. b) sklaidos lauko plotį. MMM pilnutinių išbirų variacijos padidėjimas jo naudojimo vietoje rodo, kad jis dėl segregacijos procesų ne tik susmulkėjo, bet ir tapo mažiau homogeniškas.

Taikant teorinį matematinį modelį (2.3) iš eksperimentinių duomenų gautos PBS MMM (KG1), o granulimetrinės sudėties regresijos lygtys, kai ėminiai buvo imami iš SK ir iš GKK (3.9 pav.). Didžiausios standartinių nuokrypių (s_{pmax}) reikšmės gautos pilnutinių išbirų per tuos sietus, kurių vidurkiai (\bar{p}) sudaro 50–70 %.



3.8 pav. Pilnutinių išbirų pro laboratorinius sietus taškinės diagramos, kai bandiniai paimti: a) sandėliavimo krūvos ($n = 14$); b) geležinkelio kelio konstrukcijos ($n = 35$)

Fig. 3.8. Percent passing scatterplot histograms of samples taken from:
a) stockpile ($n = 14$); b) railway track construction ($n = 35$)

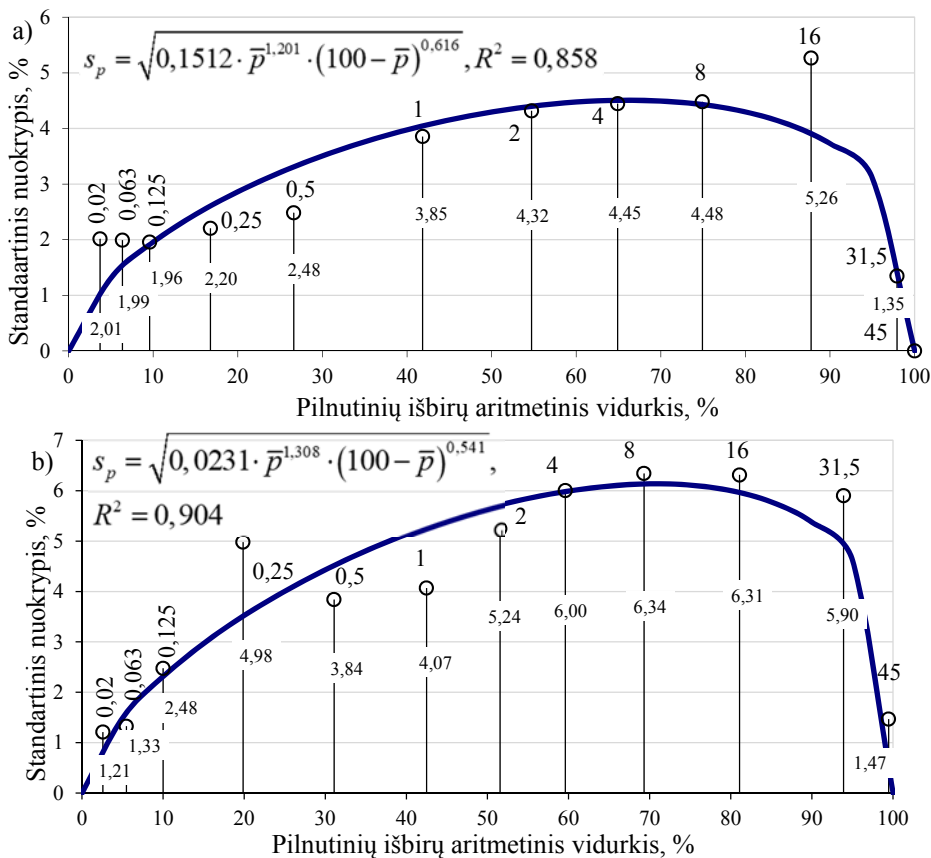
Artimos vienetui determinacijos koeficiento (R^2) vertės rodo, kad PBS MMM (KG1) pilnutinių išbirų per sietus standartinio nuokrypio (s_p) kitimas daugiau kaip 90 % nulemtas aritmetinio vidurkio (\bar{p}) kitimo, o gautos regresijos lygtys (3.9 pav.) yra patikimos. Apskaičiuotos ordinatės rodo stiprią koreliacinę sąsają tarp PBS skirto MMM granulimetrinės sudėties sklaidos ir padėties charakteristikų ir gali būti naudojamos skirtingose vietose imamų ėminių granulimetrinės sudėties variacijai vertinti.

Apskaičiuoti svertiniai dispersijų vidurkiai tiriamų savybių, kai ėminiai imti iš skirtingų technologinio proceso vietų: MMM granulimetrinės sudėties (pilnutinių išbirų per sietus) $s_{pmax} = 4,51 \%$ ir $s_{pmax} = 6,14 \%$, pralaidumo vandeniui

$s_{p\max} = 3,74 \cdot 10^{-7} \text{ m/s } \%$ ir $s_{p\max} = 2,87 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, tankio $s_{p\max} = 0,092 \cdot \text{kg/m}^3$ ir $s_{p\max} = 0,081 \cdot \text{kg/m}^3$.

Pritaikius Bartleto kriterijų (2.4 formulė) gautos reikšmės pateiktos 3.4 lentelėje.

Palyginę dviejų technologinio proceso vietų granuliometrinių išbūrų pro laboratorinius sietus, mišinio tankio, vandens pralaidumo dispersijas, gavome, kad jos su pasirinktu reikšmingumo lygmeniu, $\alpha = 0,05$ statistiškai nesiskiria ($B < 3,87$), t. y. jos yra lygios (3.4 lentelė). Mažiausias būtinasis ėminių skaičius pateiktas 3.5 lentelėje.



3.9 pav. Mineralinių medžiagų mišinio granuliometrinės sudėties variacijos (s_p) ir padėties rodiklio (\bar{p}) koreliacija: a) sandėliavimo krūva;

b) geležinkelio kelio konstrukcija

Fig. 3.9. Correlation between the parameters of sub-ballast mineral aggregate mixture gradation variation (s_p) and position (\bar{p}): a) stockpile; b – railway track construction

Didžiausi standartiniai nuokrypiai (s_{pmax}) gauti imant ėminių iš SK (4,51 %), kai išbyrų per sietus aritmetinis vidurkis buvo 70 % ir iš GKK (6,14 %), kai išbiros per sietus aritmetinis vidurkis buvo 70 % (3.5 lentelė). Kai leidžiama santykinė paklaida, $\delta = 10\%$, tai gautas MBS iš SK – $n = 4$ ir iš GKK – $n = 6$.

Mažiausias reprezentatyvus imties didumas, MMM (KG1) tankiui nustatyti, kai $\delta = 5\%$, turi būti $n = 4$, o kai $\delta = (10 - 20)\%$, tai $n = 1$ (3.6 lentelė).

MMM (KG1) pralaidumas vandeniui pasižymi didžiausia variacija iš visų savybių: jo variacijos koeficientas kito nuo 146,7 % (ėminių iš SK) iki 69,5 % (ėminių iš GKK). Šiai savybei nustatyti būtina imti daugiausiai atskirųjų ėminių n (3.5 lentelė).

3.4 lentelė. Mineralinių medžiagų mišinio (KG1) iš skirtingų ėmimo vietų imčių dispersijų vienodumo tikrinimas pagal Bartleto kriterijų

Table 3.4. Bartlett criteria testing results of mineral aggregate mixture (KG1) dispersions of different sampling locations

Savybė	Vieta	Standartinis nuokrypis	Statistika B	Išvada
Granulimetrinė sudėtis	SK	4,51	3,07	Vienodos
	GKK	6,14		
Mišinio tankis	SK	0,092	0,27	Vienodos
	GKK	0,081		
Vandens pralaidumas	SK	$3,74 \cdot 10^{-7}$	0,72	Vienodos
	GKK	$2,87 \cdot 10^{-7}$		

Pastaba: $\chi^2_{v,\infty} = 3,84$

3.2. Balasto skaldos savybių kaitos technologinio proceso metu statistinis tyrimas

Šiame poskyryje BS įrengti naudojamos granito skaldos savybių nustatymui buvo gauti kokybinių rodiklių duomenys, kurie ištirti AB „Problematika“ laboratorijoje. Ėminiai buvo paimti iš keturių skirtingų technologinio proceso vietų: nejudančios transporterio juostos (TJ), sandėliavimo krūvos (SK), transportuojančio vagono (V) ir GKK. 3.6 lentelėje pateiktas bandinių skaičius, kuriems buvo nustatytos savybės AB „Problematika“ laboratorijoje. Kiekvienai granito skaldos savybei nustatyti padėties (aritmetinis vidurkis) ir sklaidos (standartinis nuokrypis) parametrai. Nubraižytos histogramos ir normaliojo skirstinio teorinės kreivės. Patikrinta duomenų pasiskirstymo atitiktis normaliniam (Gauso) dėsnui.

3.5 lentelė. Mažiausias būtinasis skaičius mineralinių medžiagų mišinio (KG1) savybėms nustatyti
Table 3.5. Compulsory minimal number of samples to identify properties of mineral aggregate mixture (KG1)

Statistiniai rodikliai	Santykinė paklaida δ , %, kai ėminių ėmimo vieta													
	SK ir GKK							SK						
	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10
Granulimetrinė sudėtis														
Aritm. vid., %	70							65						
Didž. stand. nuok., %	6,07							4,51						
Var. koef., %	8,7							6,9						
MBS, n	23	6	3	2	13	4	2	1	24	6	3	2	2	2
Mišinio tankis														
Aritm. vid., kg/m ³	2,111							2,102						
Didž. stand. nuok., kg/m ³	0,0817							0,092						
Var. koef., %	3,9							4,4						
MBS, n	3	1	1	1	4	1	1	1	3	1	1	1	1	1
Vandens pralaidumas														
Aritm. vid., m/s	$3,65 \cdot 10^{-7}$							$2,55 \cdot 10^{-7}$						
Didž. stand. nuok., m/s	$3,31 \cdot 10^{-7}$							$3,74 \cdot 10^{-7}$						
Var. koef., %	90,7							146,7						
MBS, n	1265	317	141	80	3307	827	368	207	743	186	83	47	47	47

3.6 lentelė. Granito skaldos bandinių skaičius iš skirtingų technologinio proceso vietų
Table 3.6. Number of granite samples taken from different locations of the technological process

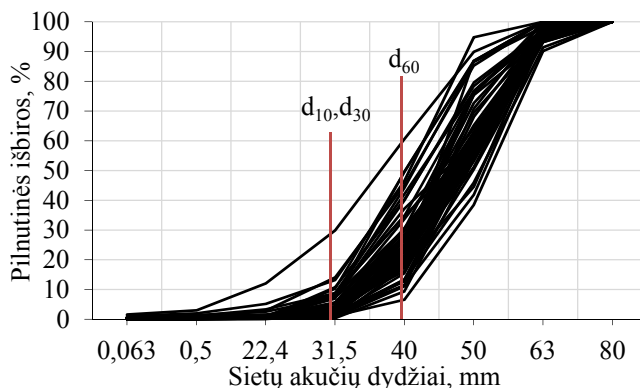
Ėminių ėmimo vietos		Savybė					
		Granulio-metrinė sudėtis	M_{DE}	DEN_p , Mg/m ³	WA_{24} , cm	SZ_{RB}	LA_{RB}
Bandinių skaičius	TJ	6	4	3	3	4	3
	SK	9	1	1	1	1	1
	V	32	29	26	26	29	29
	GKK	16	2	2	2	2	2
	Iš viso	63	36	32	32	36	36

Tyrimo rezultatai rodo, kad BS skirtos granito fizinės ir mechaninės skaldos savybės nuo pagaminimo vietos iki panaudojimo vietos kinta. O kitimo laipsnis mažai ištirinėtas ir priklauso nuo konkrečių vietinių sąlygų.

Ištirus granito skaldos 63 ėminius, paimtus iš skirtingų technologinio proceso vietų: TJ, SK, V ir GKK, gautos granulimetrinės sudėties kreivės (3.10 pav.).

Apskaičiuotieji sklaidos parametrai rodo, kad granulimetrinės sudėties didžiausi standartiniai nuokrypiai yra dalelių, kurių dydis 40 ir 50 mm, o variacijos koeficientas yra didžiausias dalelių, kurios mažesnės už 31,5 mm (3.7 lentelė).

Pakankamai didelės sklaidos parametrai (standartinio nuokrypio ir variacijos koeficientų) leidžia teigti, kad granito skaldos ėminiai paimti iš skirtingų technologinio proceso etapų yra nevienodi.



3.10 pav. Granito skaldos atskirų bandinių paimtų iš skirting technologinio proceso vietų granulimetrinė sudėtis

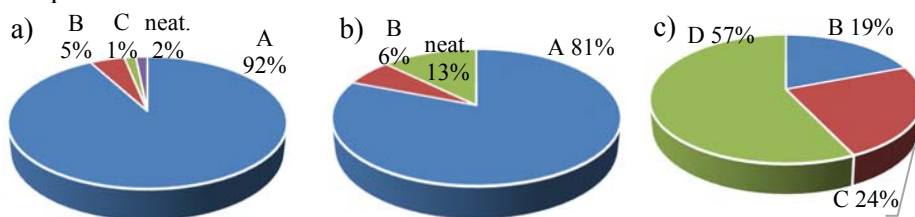
Fig. 3.10. Gradation of granite samples taken from different technological processes locations

Iš granito skaldos granulimetrinės sudėties kreivių (3.10 pav.), gauti dalelių skersmenys, atitinkantys 10 %, 30 % ir 60 % pilnutines išbias per sietus, yra $d_{10} = 31,5$ mm, $d_{30} = 31,5$ mm ir $d_{60} = 40$ mm. Vienodumo koeficiento reikšmė ($C_u = 1,27 < 6$) rodo, kad kreivės yra blogo (B) išlinkio, o pagal sanklodos rodiklį ($C_c = 0,79 < 1$) yra įvairios (P) sanklodos (2.1 lentelė).

3.7 lentelė. Granito skaldos granulimetrinės sudėties rezultatai ir statistiniai rodikliai
Table 3.7. Crushed granite gradation distribution and statistical parameters

Statistiniai rodikliai, %	Sietų akučių dydžiai, mm						
	0,063	0,5	22,4	31,5	40	50	63
Aritmetinis vidurkis	0,28	0,49	1,02	4,83	25,52	63,62	96,5
Standartinis nuokrypis	0,26	0,5	1,64	4,41	10,98	12,3	2,16
Variacijos koeficientas	92,9	102	160,8	91,3	43	19,3	2,2

Dideli smulkių dalelių (0,5 mm) ir mineralinių dulkių (0,063 mm) kiekiai yra neigiamą efektą BS sukeliantys veiksniai. Eksploatuojant BS jos migruoja į PBS ir taip padidina BS ir PBS maišymąsi. Granito skaldos gamybos stadijoje ir eksploatacijos metu šių dalelių kiekis turi būti kuo mažesnis. Smulkių dalelių (0,5 mm) ir mineralinių dulkių (0,063 mm) kiekiai būtinai turi būti tikrinami pagaminimo vietoje. Patartina tikrinti šiuos kiekius ir kituose technologinio proceso etapuose (LST EN 13450). Ištirtų BS granitinės skaldos ėminių atitiktis klasėms pateikta 3.11 paveiksle.

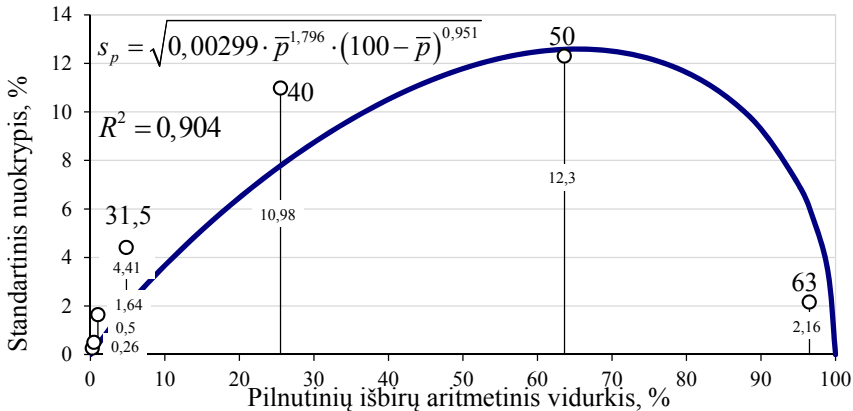


3.11 pav. Ištirtų balasto sluoksnio granito skaldos bandinių atitiktis klasėms:
a) mineralinių dulkių (0,063 mm) kategorijos; b) smulkių dalelių (0,5 mm) kategorijos;
c) balasto sluoksnio granulimetrinės sudėties kategorijos

Fig. 3.11. Investigated granite of railway ballast clasification into classes results:
a) mineral fines (0,063 mm) content category; b) fine particle (0,5 mm) category;
c) railway ballast grading category

Ištirtoje granito skaldoje esančių mineralinių dulkių kiekis atitinka 92 % A klasę (3.11 pav. a), o smulkių dalelių kiekis 81 % (3.11 pav. b) atitinka A klasę. Iš pilnutinių išbirų per laboratorinius sietus duomenų matyti, kad daugumą sudaro D klasės BS skalda (57 %) (3.11 pav. c).

Panaudojus BS skirtos granito skaldos eksperimentinius granulimetrinės sudėties 63 ėminių statistinius duomenis gauta bendra homogeniškumo regresijos lygtis (3.12 pav.).



3.12 pav. Granulimetrinės sudėties variacijos (s_p) ir padėties rodiklio (\bar{p}) koreliacija

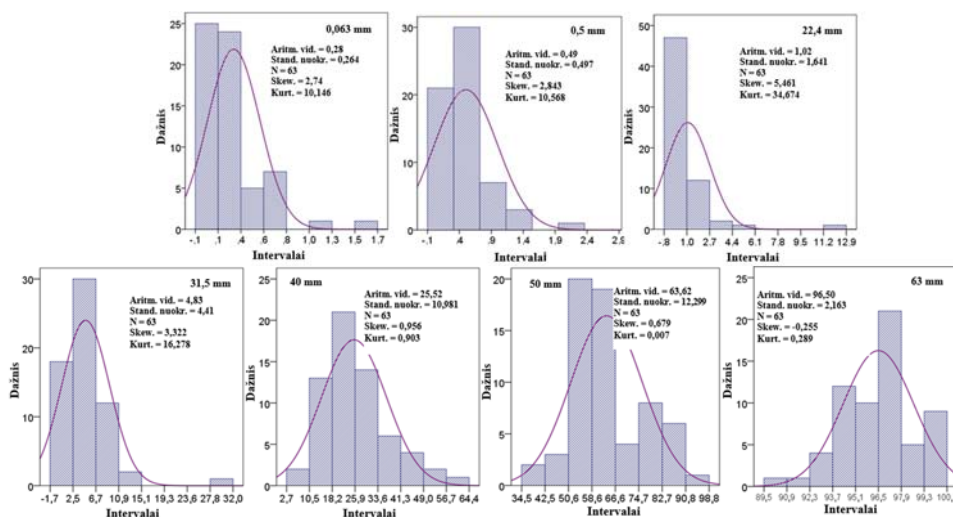
Fig. 3.12. Correlation between the parameters of ballast material gradation variation (s_p) and position (\bar{p})

Determinacijos koeficiento ($R^2 = 0,904$) vertės rodo, kad visų BS granito skaldos pilnutinių išbirų per sietus standartinio nuokrypio s_p kitimas daugiau kaip 90 % nulemtas aritmetinio vidurkio (\bar{p}) kitimo. Gauta regresijos lygtis (3.12 pav.) yra patikima, o iš jos apskaičiuotos ordinatės rodo stiprią koreliacinę sąsają su granulimetrinės sudėties charakteristikomis – gali būti naudojama skirtingose vietose imtų ėminių granulimetrinės sudėties homogeniškumui vertinti.

BS skirtos granito skaldos pilnutinių išbirų per atskirus laboratorinius sietus statistiniai rodikliai, histogramos ir normaliojo (Gauso) skirstinio teorinės kreivės pateikti 3.13 paveiksle.

Išbyrėjusių per sietų akelių dydžius 40 mm, 50 mm ir 63 mm dalelių masė turi simetrinę artimą normaliniam skirstinį. Dalelės, kurių dydis yra nuo 0,063 mm iki 31,5 mm, turi teigiamą (dešinės pusės) asimetriją, nes jų kiekiai histogramose pasiskirstę kairėje aritmetinio vidurkio pusėje – didžioji dalis reikšmių yra aritmetinio vidurkio kairėje pusėje (3.13 pav.).

Esant eksperimentinių duomenų didelei asimetrijai tolstama nuo normaliojo skirstinio. Tik kai duomenys pasiskirstę pagal normalųjų (Gauso) dėsnį, galima taikyti, Bartleto kriterijų dispersijų vidurkiui skaičiuoti. Šis kriterijus yra labai jautrus skirstinių nenormališkumui.



3.13 pav. Granitinės skaldos pilnutinių išbirų per laboratorinius sietus histogramos ir statistiniai rodikliai

Fig. 3.13. Statistical indicators and histograms of granite particles passed through sieves

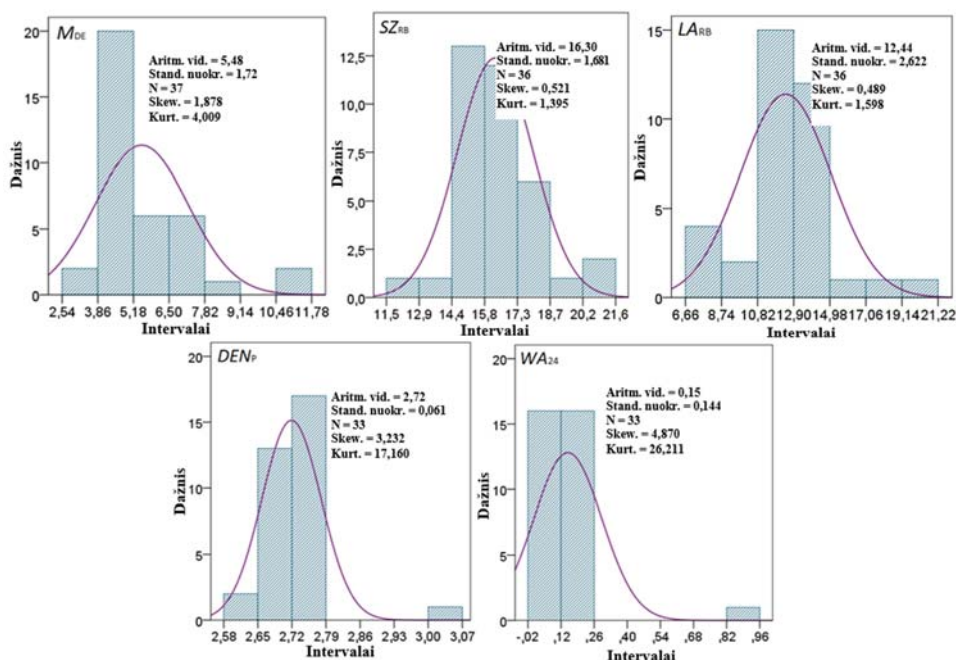
Savybių (M_{DE} , SZ_{RB} , LA_{RB} , DEN_p ir WA_{24}) tyrimams ėminių skaičius yra pateiktas 3.6 lentelė. Iš gautų statistinių rodiklių (3.7 lentelė), matyti, kad labiausiai varijuojančios savybės yra M_{DE} ir WA_{24} , kur atitinkamai variacijos koeficientai yra lygūs 31,4 % ir 96,0 %. To priežastys gali būti uolienos žaliavos nevienodumas, ėminių ėmimo ir bandymo paklaidos.

3.7 lentelė. Granito skaldos kitų savybių pasiskirstymas

Table 3.7. Granite other properties distribution

Statistiniai rodikliai	Tiriamos savybės				
	M_{DE}	SZ_{RB}	LA_{RB}	DEN_p	WA_{24}
Aritm. vid.	5,5	16,3	12,4	2,7	0,2
Stand. nuokr.	1,7	1,7	2,6	0,1	0,1
Var. koef.	31,4	10,3	21,1	2,2	96,0

Rodiklių SZ_{RB} ir LA_{RB} reikšmių pasiskirstymas yra simetrinis ir artimas normaliniam skirstiniui (3.14 pav.). Kitos savybių (M_{DE} , DEN_p ir WA_{24}) reikšmės turi teigiamą (dešinės pusės) asimetriją, nes jų kiekiai histogramose pasiskirstę kairėje vidurkio pusėje – didžioji dalis reikšmių yra aritmetinio vidurkio kairėje pusėje (3.14 pav.).

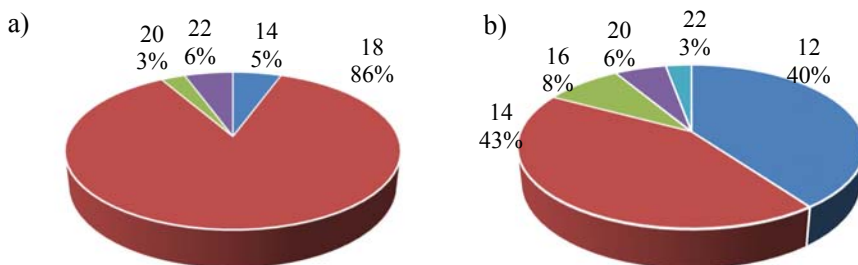


3.14 pav. Granito skaldos savybių histogramos ir statistiniai rodikliai

Fig. 3.14. Granite characteristics and statistic indicators

Granito skalda tenkina 18 klasę atsparumo trupinimui (SZ_{RB}), bei 12 ir 14 klases Los Andželo koeficiento (LA_{RB}) klases (3.15 pav.).

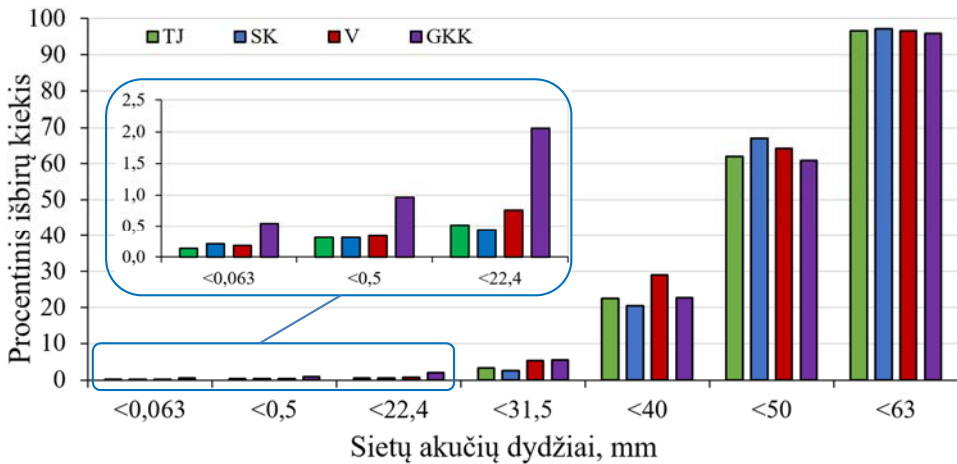
Granito skaldos atsparumas trupinimui atliktas dviem skirtingais metodais: Los Andželo (LA_{RB}) metodu būgne ir smūginiu metodu. Gauti rezultatai rodo, kad šiais skirtingais metodais išbandyti bandiniai skiriasi (3.7 lentelė). SZ_{RB} metodu gauti rezultatai rodo, kad granito skalda yra aukštesnės kategorijos, nei nustatyta LA_{RB} metodu (3.15 pav.).



3.15 pav. Granito skaldos savybių klasifikacija į klases

Fig. 3.15. Granite properties classification into classes results: a) SZ_{RB} ; b) LA_{RB}

Suskinsčius paimitus granuliometrinės sudėties ėminius pagal jų paėmimo vietą į TJ, SK, V, GKK gauti aritmetinių vidurkių rezultatai (3.16 pav.). Aritmetinių vidurkių reikšmės skiriasi, todėl nutarta granuliometrinės sudėties ir kitų savybių po keturis aritmetinius vidurkius palyginti pagal jų paėmimo vietą naudojant KV metodą. Šis metodas tinka tikrinti aritmetinių vidurkių vienodumą, kai imčių skaičius skiriasi.



3.16 pav. Skirtingose technologinio proceso vietose paimtų granito skaldos imčių aritmetinių vidurkių skirtumai

Fig. 3.16. Granite samples taken from different technological processes mean differences

Nustatant pilnutinių išbirų per atskirus laboratorinius sietus, aritmetinių vidurkių vienodumą, buvo išnagrinėtos keturios skirtingos ėminių ėmimo vietos t. y. TJ, SK, V ir GKK ($k = 4$). Imčių skaičiai kiekvienoje vietoje yra atitinkamai lygūs $n = 6$ (TJ), $n = 9$ (SK), $n = 32$ (V) ir $n = 16$ (GKK) (3.7 lentelė). Kiekvienos ėminių ėmimo vietos pilnutinių išbirų per laboratorinius sietus aritmetiniai vidurkiai buvo suranguoti nuo 1 iki paskutiniojo skaičiaus (imties didumo) didėjimo tvarka ir apskaičiuoti imties rangų sumos kvadratai (r_j^2). Apskaičiuotos β ir H statistikos 3.8 lentelė.

Pilnutinių išbirų per laboratorinius sietus, bei kitų savybių aritmetiniai vidurkiai pagal KV yra vienodi, nes H statistika visų keturių ėmimo vietų $\chi_{0,05}^2 > H$ (3.8 lentelė).

Palyginus statistiką β reikšmes su priimtu reikšmingumo lygmeniu ($\alpha = 0,05$), gauta, kad nuo 0,063 mm iki 40 mm dydžio dalelių pilnutinių išbirų skirstiniai skiriasi ($\alpha > \beta$). Keturių ėmimo vietų 50 mm ir 63 mm pilnutinių išbirų

aritmetiniai vidurkiai nesiskiria ($\alpha \leq \beta$), nes $\beta = 0,461$ ir $\beta = 0,575$ yra didesni už $\alpha = 0,05$.

3.8 lentelė. Kruskal-Wallis ranginis kriterijus nepriklausomoms imtims

Table 3.8 Kruskal-Wallis test for independent samples

Stat. rodikliai		Pilnutinės išbiros per sietus							M_{DE}^*	SZ_{RB}^{**}	L_{AR}^{**}	DE_{p}^{**}	WA_{24}^{**}
		0,063	0,5	22,4	31,5	40	50	63					
Aritm. vidurk.	TJ	0,13	0,32	0,52	3,40	22,42	62,08	96,63	5,03	15,80	13,58	2,713	0,177
	SK	0,21	0,31	0,44	2,63	20,49	66,98	97,12	9,50	19,25	22,20	2,840	0,480
	V	0,19	0,34	0,76	5,39	28,94	64,33	96,62	0,53	16,27	12,11	2,713	0,123
	GK K	0,55	0,96	2,06	5,48	22,68	60,87	95,86	5,75	14,45	11,00	2,690	0,105
H		20,61 4	12,03 6	10,20 2	9,995	12,79	2,582	1,988	5,292	4,907	4,847	0,335	3,251
β		0,001	0,007	0,017	0,019	0,005	0,461	0,575	0,152	0,179	0,183	0,953	0,355

Pastaba: $\chi^2_{0,05} = 81,38$, $\chi^2_{0,05} = 49,80$, $\chi^2_{0,05} = 44,99$

Jei aritmetiniai vidurkiai vienodi, tai BS granito skalda pagal granulimetrinę sudėtį yra vienoda nuo jos pagaminimo iki panaudojimo vietų. Jos atskirųjų frakcijų grūdelių dydžiai statistiškai nesiskiria. Jei aritmetiniai vidurkiai nesiskiria, tai granitinės skaldos stambioji dalis technologiniuose etapuose smulkėjo nežymiai.

Kitų fizinių ir mechaninių BS granito skaldos rodiklių keturių imčių aritmetiniai vidurkiai nesiskiria ($0,152 < \beta < 0,953$), nes β yra didesni už $\alpha = 0,05$. Ištirtų fizinių ir mechaninių savybių aritmetinių vidurkių statistinis vienodumas rodo, kad uolienos savybės technologiniuose etapuose nekito. Pagal skirtingus kriterijus gautos eksperimentinių duomenų atitikties normaliajam skirstiniui pateiktos 3.9 lentelė. Atskirų ėminių ėmimo vietų (TJ, SK, V ir GKK) atitikimai normaliniam skirstiniui pateikti B priede.

Empyrinių (eksperimentinių) duomenų skirstinių atitikties normaliniam skirstiniui tikrinimo rezultatai (3.9 lentelė ir B priedas) rodo, kad pagal Pearson (χ^2) dauguma visų ėminių BS savybių, taip pat ir iš atskirų ėminių ėmimo vietų, atitinka normalųjį (Gauso) skirstinį (3.9 lentelė, „+“ ženklų pažymėta).

Pritaikius teorinį matematinį modelį (2.3) iš eksperimentinių duomenų gautos BS granulimetrinės sudėties regresijos lygtys, kai ėminiai buvo imami iš TJ, SK, V ir GKK (3.17 pav.). Didžiausios standartinių nuokrypių (s_{pmax}) reikšmės gautos pilnutinių išbirų per tuos sietus, kurių vidurkiai (\bar{p}) sudaro 50–70 %.

3.9 lentelė. Eksperimento duomenų pasiskirstymo atitikimas normaliajam skirstiniui
Table 3.9. Conformity of data distribution to requirements of normal ditribution

Rodiklis		Normaliojo skirstinio tikrinimo metodai									
		SKEW	Išv.	KURT	Išv.	KS	Išv.	SW	Išv.	χ^2	Išv.
Pilnutinės išbiros, %	0,063	2,74	–	10,146	–	0,244	–	0,701	–	83,83	–
	0,5	2,843	–	10,568	–	0,256	–	0,689	–	66,29	+
	22,4	5,461	–	34,674	–	0,313	–	0,417	–	40,81	+
	31,5	3,322	–	16,278	–	0,206	–	0,707	–	13,67	+
	40	0,956	–	0,903	+	0,123	+	0,939	–	4,21	+
	50	0,679	+	0,007	+	0,187	–	0,928	–	5,97	+
	63	–0,255	+	0,289	+	0,09	+	0,959	+	40,11	+
M_{DE}^*		1,878	–	4,009	–	0,245	–	0,808	–	10,87	+
SZ_{RB}^*		0,521	+	1,395	+	0,092	+	0,958	+	8,78	+
LA_{RB}^*		0,489	+	1,598	+	0,128	+	0,933	–	7,33	+
DEN_F^{**}		3,232	–	17,160	–	0,312	–	0,571	–	46,09	–
WA_{24}^{**}		4,870	–	26,211	–	0,305	–	0,447	–	11,09	+

Pastaba: Normaliojo skirstinio patikros skirtingais metodais kritinės reikšmės: $SKEW - 3s_{sk} = 0,906$, $3s_{sk}^* = 1,178$, $3s_{sk}^{**} = 1,243$, $KURT - 5s_{ku} = 2,975$, $5s_{ku}^* = 3,84$, $5s_{ku}^{**} = 4,047$; $KS - d_{0,05} = 0,171$, $d_{0,05}^* = 0,226$, $d_{0,05}^{**} = 0,234$; $SW - w_c = 0,947$, $w_c^* = 0,935$, $w_c^{**} = 0,930$; Pearson – $\chi_{0,05}^2 = 81,38$, $\chi_{0,05}^{2*} = 49,80$, $\chi_{0,05}^{2**} = 44,99$.

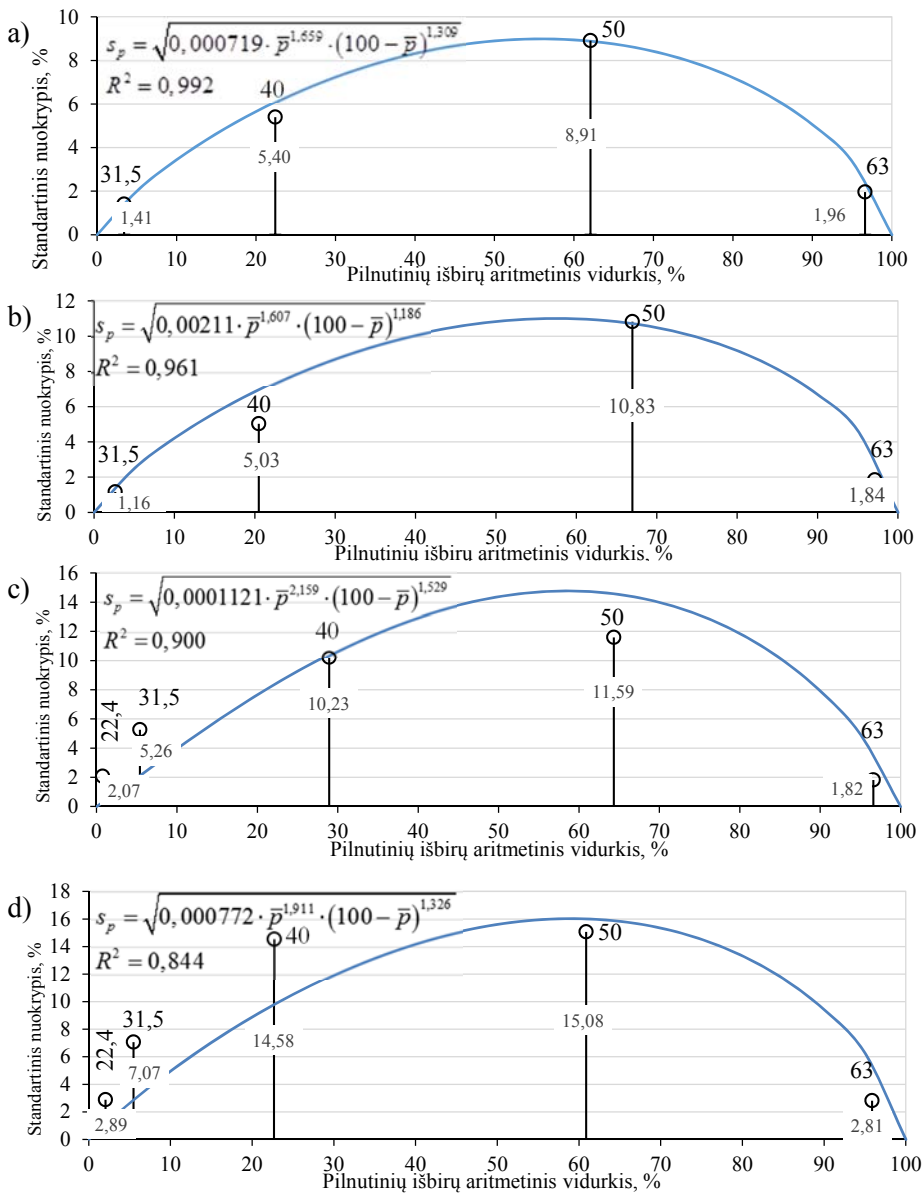
Didžiausias homogeniškumas yra granito skaldos, kai ėminiai buvo imti iš TJ ($s_p = 9,03\%$, kai $\bar{p} \approx 55\%$), mažiausias homogeniškumas, kai ėminiai buvo imti iš paskutinės technologinio proceso vietos – GKK ($s_p = 16,03\%$, kai $\bar{p} \approx 58\%$).

Skirtingų ėminių ėmimo vietų regresijos lygčių, kurios yra patikimos, nes R^2 artimas 1, gautos ordinate, rodančios didžiausias standartinių nuokrypių reikšmes pateiktos 3.18 paveiksle.

Gauti modelio rezultatai rodo, kad kai BS skirta granito skalda yra iškart pagaminta (ėminiai paimti iš TJ) determinacijos koeficientas buvo $R^2 = 0,992$. Kai granito skalda buvo perkrauta ir transportuota keletą kartų, ne tik determinacijos koeficientas sumažėjo, bet ir standartinis nuokrypis padidėjo. Tai reiškia, kad BS granito skaldos savybės/kokybė technologinio proceso etapais vis blogėjo (3.18 pav.).

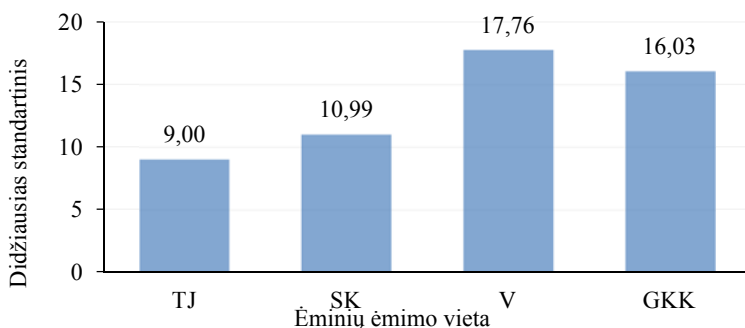
Suskirsčius į keturias grupes paimtus ėminius pagal jų paėmimo vietą į TJ, SK, V, GKK gauti granulimetrinės sudėties standartiniai nuokrypiai, rodantys jų skirtumus (3.19 pav.).

Iš 3.19 paveiksle gautų skirtumų matyti, kad granito skaldos granulimetrinės sudėties pilnutinių išbirų standartiniai nuokrypiai didėja, šią medžiagą perkraunant, transportuojant ir skleidžiant sluoksniu.



3.17 pav. Granito skaldos granulometrinės sudėties variacijos (s_p) ir padėties rodiklio (\bar{p}) koreliacija: a) transporterio juosta; b) sandėliavimo krūva; c) transportuojantis vagonas; d) geležinkelio kelio konstrukcija

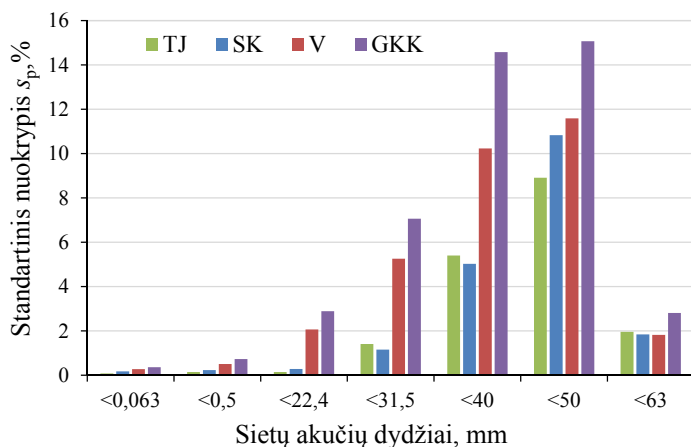
Fig. 3.17. Correlation between the parameters of granite gradation variation (s_p) and position (\bar{p}): a) transporter belt; b) stockpile; c) wagon; d) railway track construction



3.18 pav. Didžiausių standartinių nuokrypių skirtumai skirtingais technologinio proceso etapais

Fig. 3.18. Differences between the sampling location according to the max values of standard deviation of percent passing

Ar BS granito skaldos homogeniškumas žymiai mažėjo medžiagą kraunant, transportuojant ir skleidžiant sluoksniu, buvo tiriama palyginant keturių imčių granulimetrinės sudėties dispersijas. Keturioms nepriklausomoms, normalinių skirstinių atitinkančioms, bet skirtingo didumo imtims palyginti buvo naudojamas Bartleto kriterijus. Apskaičiuotąją statistiką B (2.4) palyginus su Pirsono (χ^2) statistika su pasirinktu pasikliovimo lygmeniu (α) ir laisvės laipsnių skaičiumi (ν), nustatyta atitiktis iškeltai nulinei hipotezei.



3.19 pav. Skirtingose technologinio proceso vietose paimtų granito skaldos imčių standartinių nuokrypių skirtumai

Fig. 3.19. Granite samples taken from different technological processes locations standard deviation differences

Iš pateiktų (3.18 pav.) didžiausių standartinių nuokrypių (s_{pmax}) verčių apskaičiuota $E = 5,024$ ir B reikšmė yra mažesnė už kritinę $\chi^2_{\alpha, \nu}(0,05, 4-1) = 7,82$. Palyginę keturių technologinio proceso vietų pilnutinių išbirų per laboratorinius sietus dispersijas, gauta, kad jos su pasirinktu reikšmingumo lygmeniu, $\alpha = 0,05$ statistiškai nesiskiria ($5,024 < 7,82$), t. y. jos lygios. Iš visų keturių skirtingų ėminių ėmimo vietų pagal (2.5) apskaičiuotoji dispersija $\bar{s}^2 = 151,028$ ir standartinis nuokrypis $\bar{s} = 12,29\%$, rodo vidutinį visų keturių ėmimo vietų BS vienaličiškumą. Nors empiriniai standartiniai nuokrypiai s_{pmax} (3.18 pav.) ir s_p (3.19 pav.) turi tendenciją didėti.

Didžiausi standartiniai nuokrypiai (s_{pmax}) gauti, imant ėminius iš V (14,76 %) ir iš GKK (16,03 %), kai išbiros per sietus aritmetinis vidurkis buvo 60 % (D priedas). Kai leidžiama santykinė paklaida, $\delta = 10\%$, tai gautas mažiausias ėminių skaičius iš V $n = 24$ ir iš GKK – $n = 28$.

Mažiausi standartiniai nuokrypiai s_{pmax} gauti, ėminių paimtų nuo nejudančios TJ (9,00 %) ir iš SK (10,99 %), kai išbiros per sietus aritmetinis vidurkis buvo apie 55 % (D priedas). Kai leidžiama santykinė paklaida, $\delta = 10\%$, tai gautas mažiausi ėminių skaičiai $n = 11$ iš TJ ir $n = 16$ iš SK.

M_{DE} rodikliui nustatyti mažiausias reprezentatyvios imties didumas, kai $\delta = 10\%$ imant ėminius nuo nejudančios TJ turi būti $n = 1$, iš SK – $n = 8$, iš V – $n = 31$ ir iš GKK – $n = 22$.

Didžiausi standartiniai nuokrypiai (s_{pmax}), SZ_{RB} nustatyti gauti imant ėminius iš GKK (2,25 %) ir iš V (1,38 %), bei SK (1,65 %) (D priedas). Kai leidžiama santykinė paklaida, $\delta = 10\%$, tai gautas mažiausias ėminių skaičius $n = 10$ iš GKK ir $n = 3$ iš V bei SK.

Mažiausias standartinis nuokrypis (s) SZ_{RB} gautas imant ėminius nuo nejudančios TJ (1,06 %). Kai leidžiama santykinė paklaida, $\delta = 10\%$, tai gautas mažiausias ėminių skaičius nuo nejudančios TJ $n = 2$.

LA_{RB} didžiausi standartiniai nuokrypiai (s_{pmax}) gauti, ėminių iš V (2,22 %) ir iš GKK (3,3 %) (D priedas). Kai leidžiama santykinė paklaida $\delta = 10\%$, tai gautas mažiausias ėminių skaičius $n = 13$ iš V ir $n = 35$ iš GKK.

Mažiausi standartiniai nuokrypiai (s) LA_{RB} gauti imant ėminius nuo nejudančios TJ (0,93 %) ir iš SK (0 %). Kai leidžiama santykinė paklaida, $\delta = 10\%$, tai gautas mažiausias ėminių skaičius nuo nejudančios TJ turi būti $n = 2$ ir iš SK – $n = 1$.

Mažiausias reprezentatyvus imties didumas, BS granito skalda DEN_p nustatytumui, kai $\delta = 5\%$, turi būti $n = 2$, o kai $\delta = (10-20)\%$, tai $n = 1$ (D priedas).

Granito skalda įmirkiui (WA_{24}) pasižymi didžiausia variacija iš visų savybių: jo variacijos koeficientas kito nuo 89,6 % (ėminių iš SK) iki 18,33 % (ėminių nuo

nejudančios TJ). Šiai savybei nustatyti būtina imti daugiausiai atskirųjų ėminių n (D priedas).

Tai rodo, kad uoliena, skirta granitinei skaldai gaminti yra ne vienodo tuštymėtumo (akytumo).

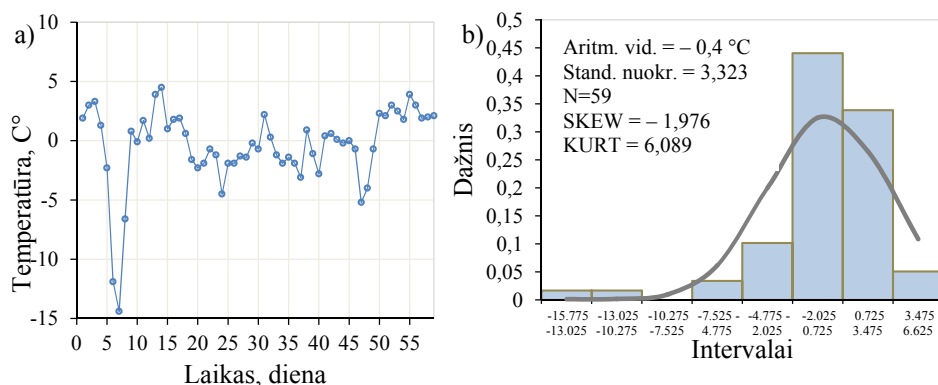
3.3. Geležinkelio kelio konstrukcijos savybių skaitinis modeliavimas

Šiame poskyryje pateikiama „SV HEAT“ programinio paketo aplinkoje sumodeliuotų GKK sluoksnių fizikiniai procesai, esant kintamai AOT ir sniego dangai, nustatant sniego dangos įtaką GKK įšalo gyliui. Gauti temperatūrų GKK sluoksniuose pasiskirstymą ir GKK įšalo gylį, buvo panaudoti virtualūs GKK skersnių profilių modeliai (2.4 pav. c, d, e) bei aplinkos oro veiksniai, 2015 metų sausio – vasario mėnesių duomenys ($I_F = -39,3$ °C·dienos) Panevėžio regione (AOT, (3.20 pav. a) ir sniego dangos storis (3.21 pav. a) iš Lietuvos hidrometeorologijos stoties).

Lietuvos klimatui būdingas pakankamai dažnas teigiamos temperatūros perdėjimas į neigiamą ir atvirkščiai (2014 metais 10 kartų, 2015 metais 11 kartų), todėl 2015 metų etaloniniais mėnesiais buvo pasirinkti sausio ir vasario mėnesiai, kai šie virsmai kartojo 5 kartus (3.20 pav. a). Temperatūrų virsmai iš teigiamos į neigiamą ir atvirkščiai bei konstrukciniuose sluoksniuose esantis vandens kiekis (drėgmė) yra neigiamą poveikį sukeliantys veiksniai. GKK sluoksniuose esanti drėgmė, kai AOT yra neigiama formuoja ledo linzes, kurios gali pakeisti GKK geometrinius parametrus.

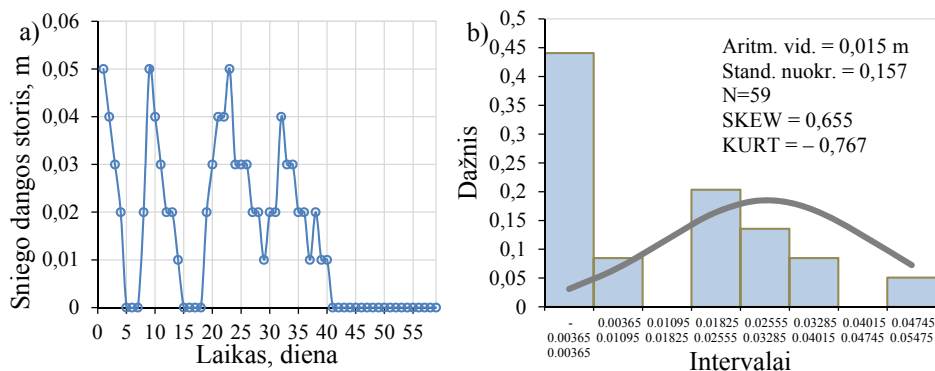
Kuo didesnis drėgmės kiekis konstrukciniuose sluoksniuose, tuo didesnis neigiamos temperatūros poveikis. Konstrukciniuose sluoksniuose esantis vanduo, šalant pereina į kietąją būseną, ko pasekoje plečiasi ir ardo konstrukciniuose sluoksniuose suformuotus dalelių junginius, dėl ko gali pakisti viso kelio geometriniai parametrai.

Skaitinio modeliavimui buvo pasirinkta tipinės (dažniausiai naudojamos) konstrukcijos (2.4 pav. c, d, e), tiesiant geležinkelio kelius Lietuvoje (Apsauginio... 2013) ir Slovakijoje (TNŽ 72 1514:2000; TNŽ 73 6312:2005; Predpis... 2012). Ją sudaro sankasa įrengiama iš smėlių mišinio (storis 0,55 m), KG1 sluoksnis, įrengtas iš 0/32 mm frakcijos mineralinių medžiagų mišinio (2.4 pav. c) storis 0,4 m; 2.4 pav. d – 0,5 m; 2.4 pav. e – 0,6 m) ir balasto sluoksnis, įrengtas iš 0/63 mm frakcijos granitinės skaldos (storis 0,5 m). Sanksos kraštuose esantis natūralus dirvožemis su augmenija paskleistas 0,1 m storio sluoksniu. Natūralaus grunto, ant kurio įrengiama GKK, modeliavimui pasirinkta 1,5 m storio.



3.20 pav. Aplinkos oro temperatūros kitimas ir statistinių rodiklių kitimas (2015 metų sausis–vasaris): a) aplinkos oro temperatūra; b) sniego storio kitimo statistiniai rodikliai

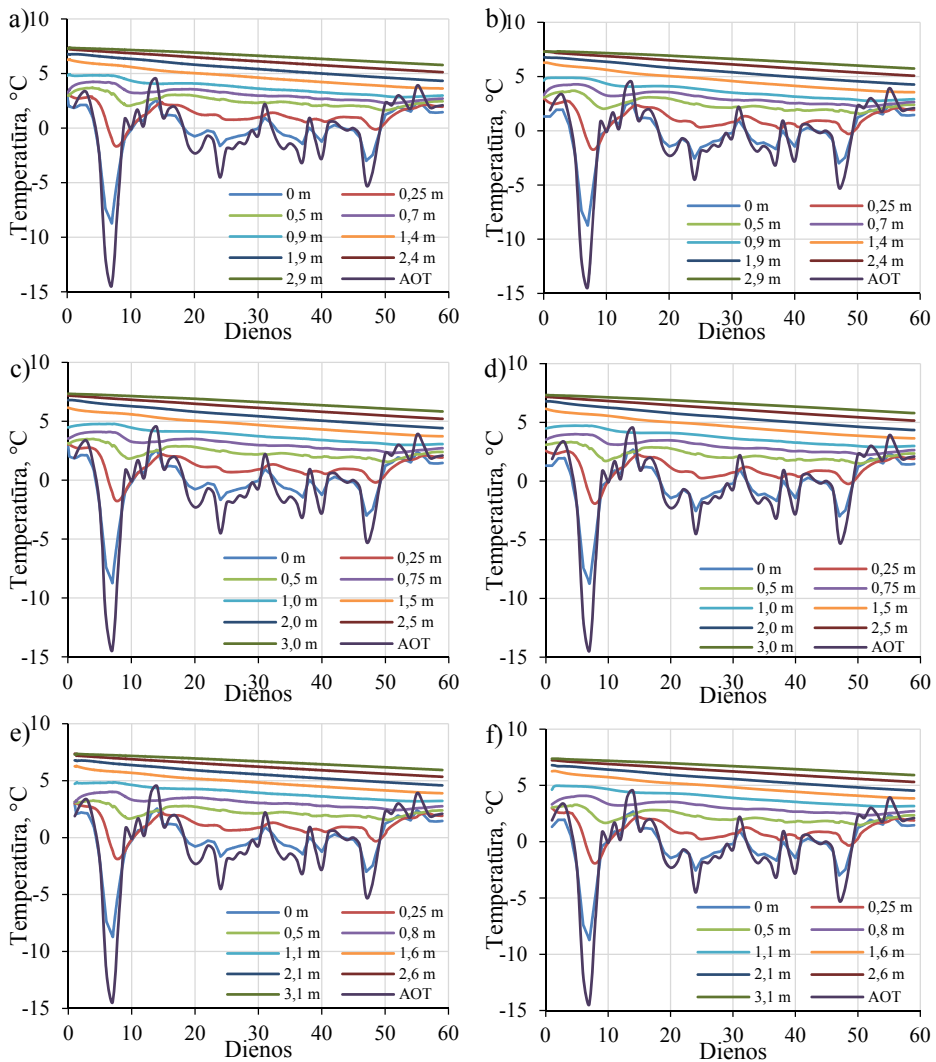
Fig. 3.20. Change of ambient air temperature and statistical indicators in railway sections in the examined period (January–February of 2015): a) ambient air temperature; b) statistical indicators – snow cover thickness change



3.21 pav. Sniego dangos storio kitimas ir statistinių rodiklių kitimas (2015 metų sausis–vasaris): a) sniego dangos storio kitimas; b) statistiniai rodikliai

Fig. 3.21. Snow cover thickness change and statistical indicators in railway sections in the examined period (January – February of 2015): a) snow cover thickness change; b) statistical indicators

Naudojant tas pačias GKK sudarančių sluoksnių fizines – mechanines savybes, tik vienu atveju modeliuojant su sniego danga, kitu atveju – be sniego dangos gauti rezultatai pateikti 3.22 paveiksle.



3.22. pav. Geležinkelio kelio konstrukcijos įšalo gylio rezultatai: a) pobalastinio sluoksnio storis 0,4 m su sniego dangą; b) pobalastinio sluoksnio storis 0,4 m be sniego dangos; c) pobalastinio sluoksnio storis 0,5 m su sniego dangą; d) pobalastinio sluoksnio storis 0,5 m be sniego dangos; e) pobalastinio sluoksnio storis 0,6 m su sniego dangą; f) pobalastinio sluoksnio storis 0,6 m be sniego dangos

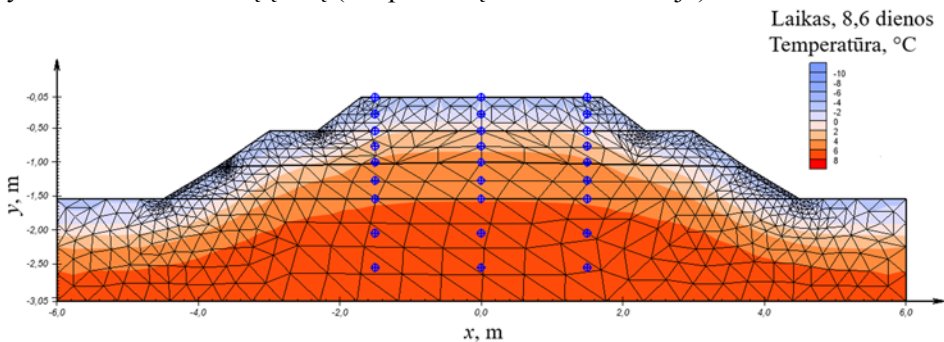
Fig. 3.22. Frost depth results of railway track constructions: a) sub-ballast layer thickness 0.4 m with snow cover; b) sub-ballast layer thickness 0.4 m without snow cover; c) sub-ballast layer thickness 0.5 m with snow cover; d) sub-ballast layer thickness 0.5 m without snow cover; e) sub-ballast layer thickness 0.6 m with snow cover; f) sub-ballast layer thickness 0.6 m without snow cover

Analizuojant GKK sluoksniuose (3.22 pav. c, d) vykstančius procesus ir temperatūrų pasiskirstymus pateikiami temperatūrų skirtumai skirtinguose sluoksniuose ir jų sąlyčio zonose (3.24 pav.). Temperatūrų vertės buvo fiksuojamos centre esančiais virtualiais termometrais (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29 – 2.5 pav.), laiko momentu $t = 0,5$ val.

Gauti temperatūrų pasiskirstymai sluoksniuose pateikti 3.23 paveiksle šalčiausiu laikotarpiu (8,6 dienos).

Skaitinio modeliavimo rezultatai rodo, kad GKK kada buvo naudojama sniego danga išalo gylis buvo mažesnis, nei konstrukcijoje be sniego dangos (3.22 pav.). Analizuojant dažniausiai naudojamą GKK, kai PBS storis yra 0,5 m, gauti rezultatai rodo, kad gautas GKK išalo gylis (0,60 m) buvo mažesnis su sniego danga (3.22 pav. c), nei konstrukcijoje be sniego dangos (0,62 m) (3.22 pav. d), laiko momentu (8,6 dienos), kai AOT didėjo ir pasiekė minus 14,4 °C bei buvo didžiausias sniego storis 0,05 m. Iš 3.24 paveiksle pateiktų temperatūrų pasiskirstymo grafikų, matyti, kad modeliavime be sniego dangos temperatūra GKK sluoksniuose buvo lygi modeliavime naudojant sniego dangą arba žemesnė. Didžiausias skirtumas (1,2 °C) gautas BS paviršiuje 24 dieną, atitinkamai BS viduryje skirtumas 1 °C (3.24 pav.) BS ir PBS sąlyčio zonoje gautas skirtumas 25 dieną 0,6 °C.

Analizuojant virtualių vertikalųjų termometrų užfiksuotas temperatūrų reikšmes galima teigti, kad PBS atliko keliamus reiklavimus – išalo gylis nepasiekė sankasos sluoksnio. Gautos temperatūrų reikšmės (3.24 pav.), rodo, kad didėjant vertikaliam atstumui nuo žemės paviršiaus, sniego dangos įtaka temperatūrų pokyčiui turi vis mažesnę įtaką (temperatūrų skirtumas mažėja).



3.23 pav. Temperatūrų pasiskirstymas geležinkelio kelio konstrukcijoje modeliavimo proceso metu

Fig. 3.23. Temperature distribution in railway track construction during modelling process

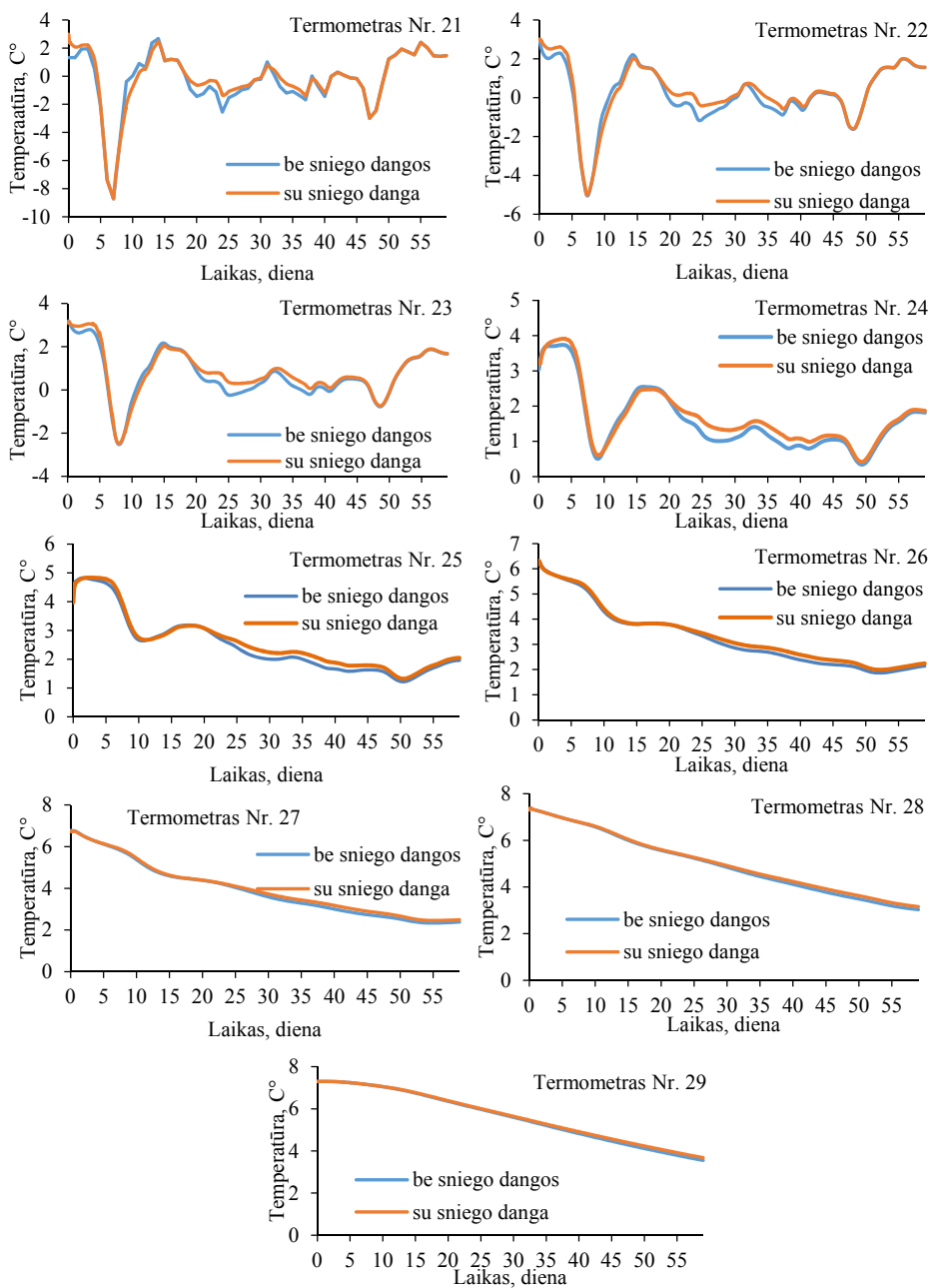
GKK skirtingame gylyje sluoksnių temperatūra kinta panašiai, kaip AOT (3.24 pav. Termometrai Nr. 21–25) – netiesiškai, o gilėjant sluoksniuose priklausomybė tampa vis labiau tiesiška.

Šios priklausomybės artimos tiesinėms (termometrai Nr. 26–29), rodo AOT vis mažesnę poveikį gilesniems GKK ir žemės sluoksniams, dėl vidinės temperatūros.

Gautos priklausomybės (3.25 pav.), rodo MMM (KG1) naudojamo rengti PBS apsauginės funkcijos efektyvumą. Nustatyta, kad duotuoju laikotarpiu (59 dienos), sankasos viršutinėje dalyje, kai buvo naudojama 0,5 m storio PBS, gautas didžiausias skirtumas 0,21 °C, lyginant su 0,4 m storio PBS rezultatais. Panaudojus 0,6 m MMM (KG1), gautas didžiausias skirtumas apie 0,52 °C. Temperatūrų skirtumas, tarp 0,5 m ir 0,6 m gautas didesnis, nei tarp 0,4 m ir 0,5 m PBS – 0,33 °C.

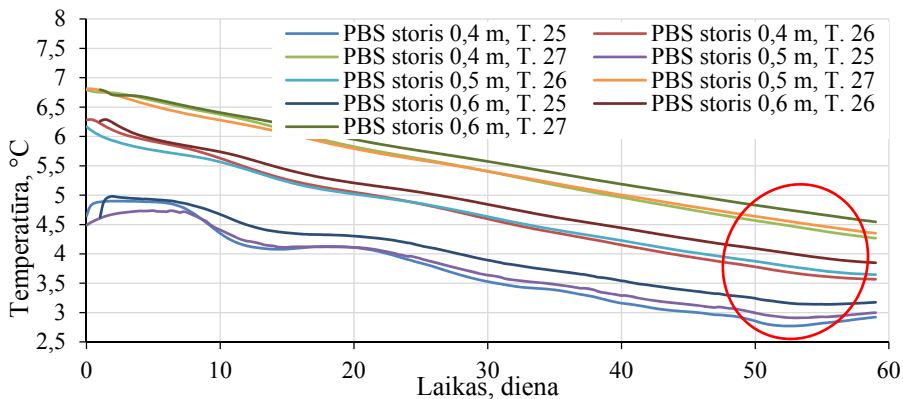
PBS naudojamo MMM (KG1) veiksmingumas, mažinant išorinės neigiamos AOT poveikį sankasos sluoksniui mažėja, (temperatūrų skirtumas mažėja) konstrukcijos vertikalėje ir sankasos sluoksniu pabaigoje gaunamas tik 0,14 °C skirtumas.

Remiantis slovakiškąją patirtimi ir GKK PBS storio parinkimo metodika, sumodeliuota GKK hidroterminiai režimai esant didžiausiam I_F per 50 metų Lietuvoje (C priedas). Lietuvos hidrometeorologijos stoties duomenimis šalčiausi periodai buvo: 1985 metų lapkričio mėn.–1986 metų kovo mėn., $I_F = -632,8$ °C·dienos; 1986 metų lapkričio mėn.–1987 metų kovo mėn., $I_F = -904,2$ °C·dienos. Vertinant globalaus šilimo padarinius sumodeliuota ir pastarųjų metų šaltieji periodai, t. y. 2013 metų lapkričio mėn.–2014 metų kovo mėn., $I_F = -260,6$ °C·dienos ir 2014 metų lapkričio mėn.–2015 metų kovo mėn., $I_F = -147,1$ °C·dienos. Modeliavimui pasirinktos konstrukcijos pateikiamos antrame skyriuje (2.4 pav.). Gauti rezultatai rodo, kad GKK rengiamos pylimuose ir iškaskose pasižymi tomis pačiomis hidroterminėmis savybėmis, kadangi modeliavimo rezultatams daugiausia įtakos turi GKK sluoksniuose esantis vandens kiekis ir AOT. Nustatyta, kad GKK be PBS neatspari neigiamoms AOT – įšalo gylis pasiekia sankasos sluoksnį. 1985/86 metais įšalo gylis pasiekė sankasos sluoksnį 80 dieną, 1986/87 metais – 69 dieną, nors naudojant šaltuosius periodus, kai I_F buvo mažesnis (2013/2014 metais ir 2014/2015 metais) įšalo gylis nepasiekė GKK sankasos sluoksniu (C priedo C.1 pav.). Kada naudojamas PBS iš MMM (KG1) (storis 0,5 m), sankasos šilimo periodas nusitęsia į 103 dieną, kai modeliuojamas šaltasis periodas 1985/1986 metų ir 82 d. – 1986/1987 metų (C priedo C.2 pav.).



3.24 pav. Temperatūrų pasiskirstymas konstrukciniuose sluoksniuose modeliuojamuoju periodu

Fig. 3.24. Temperatures distribution in construction layers during modelling period



3.25 pav. Įšalo gylio priklausomybė nuo pobalastinio sluoksnio (KG1) storio

Fig. 3.25. Frost depth dependence on sub-ballast layer (KG1) thickness

Kai modeliuojamosios GKK buvo pasirinktos P160M160F120R120, P230, P300 kur PBS įrengtas iš MMM (KG1) ir yra didesnio storio nei 0,5 m, apsaugojo sankasą nuo įšalo – 0 °C temperatūra nepasiekė sankasos sluoksnio (C priedo C.3 pav., C.4 pav., C.5 pav.).

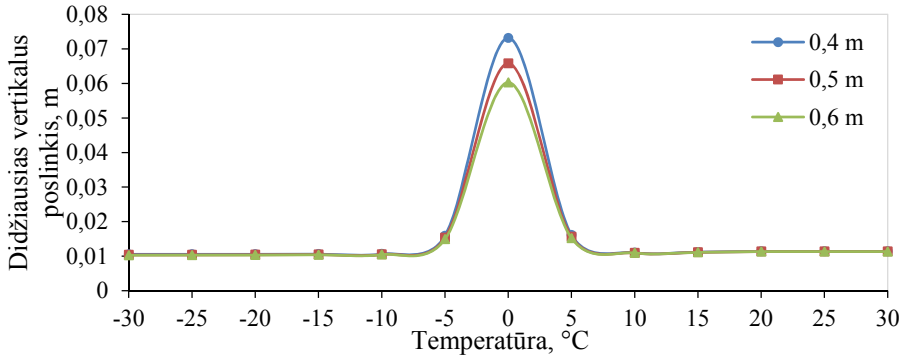
3.4. Lietuvos geležinkelio kelių geometrijos parametrų dinamika

PBS storis turi teigiamą įtaką GKK įšalo gyliui veikiant neigiamų AOT veiksniaiui (3.24 pav.), nustatyta GKK su skirtingu PBS storiumi (0,4 m, 0,5 m ir 0,6 m) GKK didžiausi vertikalūs poslinkiai veikiant riedmenų sukuriamoms apkrovoms. Panaudojus ANSYS programoje GKK modelį (2.13 pav.) gauti skirtingų skersinių profilių GKK didžiausi vertikalūs poslinkiai (3.26 pav.), kai buvo naudojami skirtingi PBS storiai (0,4 m, 0,5 m ir 0,6 m).

3.26 paveiksle gautos priklausomybės rodo, kad didžiausi vertikalūs poslinkiai gauti visose GKK, kada sluoksnio temperatūra buvo 0 °C. Simuliuojant GKK su 0,4 m PBS storiumi, esant 0 °C, visos GKK didžiausias vertikalus poslinkis gautas 0,0732 m, kai PBS storis 0,5 m – 0,0658 m, kai PBS storis 0,6 m – 0,0603 m. Galima daryti išvadą, kad GKK labiausiai vertikalčiai deformatyvi pavasario, rudens ir žiemos periodais, kada AOT yra artima 0 °C.

Skaitinio modeliavimo metu, taip pat gautos GKK atskirų sluoksnių (BS, PBS, sankasos sluoksnio ir natūralaus grunto sluoksnio) poslinkių priklausomybės (3.27 pav.). Atskirų GKK sluoksnių poslinkių priklausomybės nuo tempera-

tūros, kai buvo naudojamas skirtingas PBS storis, patvirtina prieš tai gautus rezultatus (3.26 pav.) – didžiausi vertikalūs poslinkiai GKK stebimi esant 0 °C temperatūrai GKK sluoksniuose.



3.26 pav. Visos geležinkelio kelio konstrukcijos didžiausi vertikalūs poslinkiai, kai naudojamas skirtingas pobalastinio sluoksnio storis

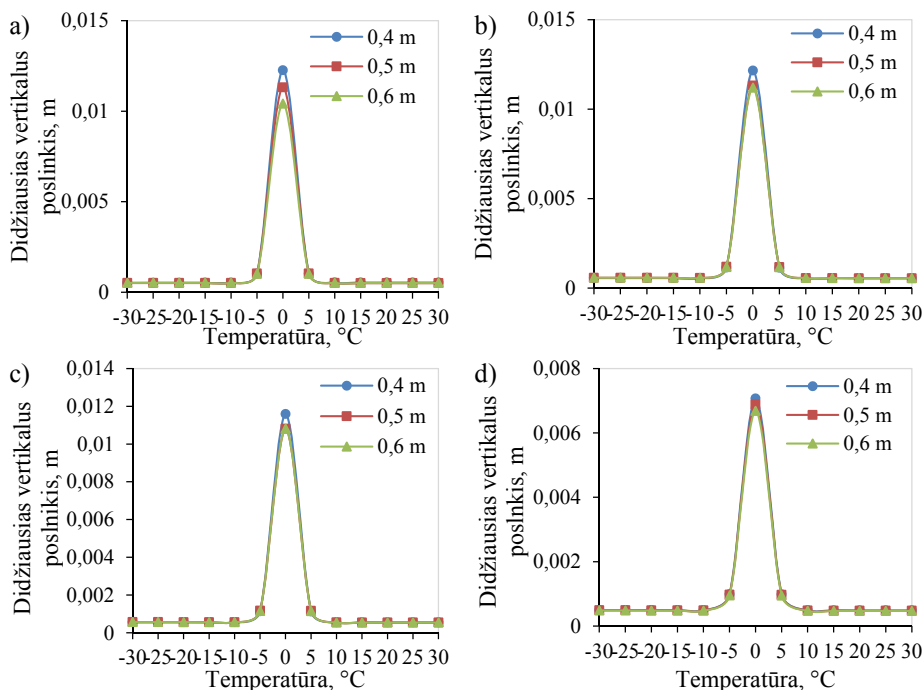
Fig. 3.26. Maximum vertical displacements of of the whole railway track construction when different thicknesses of sub-ballast were used

Didžiausių poslinkių priklausomybės nuo temperatūros sluoksniuose buvo skaitiškai modeliuojamos 5 °C žingsniu, todėl iš gautų rezultatų (3.26 pav.) siekiant nustatyti GKK standumo koeficientų priklausomybes nuo sluoksnių temperatūros, mažesniu nei 5 °C žingsniu, kurios gaunamos remiantis 2-ame skyriuje pristatytu modeliu (2.23), sudarytos regresijos lygtys (3.10 lentelė).

Regresijos lygtys suformuotos suskaidžius temperatūrų diapozoną į tris dalis: 1-oji apima diapozoną nuo minus 30 °C iki plus 5 °C, 2-oji – nuo minus 5 °C iki plus 5 °C, 3-oji – nuo plus 5 °C iki plus 30 °C. Šios lygtys toliau bus naudojamos GKK atskirų sluoksnių standumo koeficiento priklausomybės nuo temperatūros sluoksniuose sudarymui.

Taip pat šios priklausomybės leidžia nustatyti didžiausių vertikalų poslinkių vertes, temperatūrų diapozonuose, kuriose nebuvo skaitiškai modeliuojama. Šių lygčių koreliacijos koeficientų reikšmės lygios 1 arba artimos šiai reikšmei, rodo, kad gautos lygtys yra patikimos ir gali būti naudojamos projektavimo, bei kitiems skaitinio modeliavimo darbams.

Panaudojus 3.26 paveiksle pateiktus rezultatus ir pritaikius 2.23 modelį, skirtą apskaičiuoti standumo koeficientą, kai $F_{kvazi} = q_a + 0,75q_a \cdot 2 + 0,5q_a \cdot 2 + 0,25q_a \cdot 2 = 900 \text{ kN}$ ($q_a = 225 \text{ kN}$), gautos GKK standumo koeficiento (K) priklausomybės, nuo temperatūros pateiktos 3.28 paveiksle.



3.27. pav. Skirtingų geležinkelio kelio konstrukcijos sluoksnių didžiausi vertikalūs poslinkiai, kai buvo naudojamas skirtingas pobalstinio sluoksnio (KG1) storis:

a) balasto sluoksnio; b) pobalstinio sluoksnio; c) sankasos sluoksnio; d) natūralaus grunto sluoksnio

Fig. 3.27. Maximum vertical displacements of different layers of the railway track construction when different thicknesses of sub-ballast (KG1) were used: a) ballast layer; b) sub-ballast layer; c) subgrade layer; d) natural ground layer

3.10 lentelė. Skirtingų geležinkelio kelio konstrukcijos sluoksnių, kai naudojamas skirtingas pobalstinio sluoksnio storis bei kinta temperatūra sluoksniuose, didžiausių vertikalų poslinkių regresijos lygtys

Table 3.10. The regression equations for maximal vertical displacements of different layers of railway track constructions when using different thickness of sub-ballast and changing temperature of layers

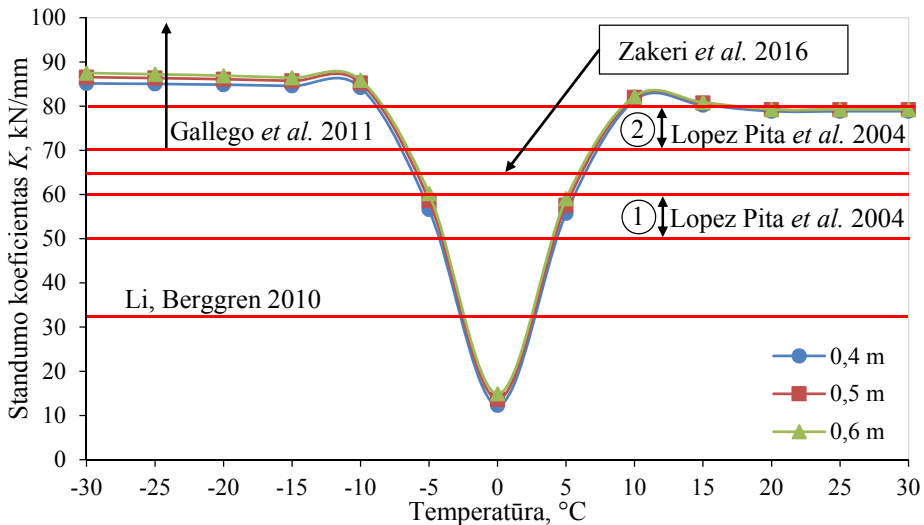
Balasto sluoksnis			
AOT PBS storis	Nuo minus 30 °C iki minus 5 °C	Nuo minus 5 °C iki plus 5 °C	Nuo plus 5 °C iki plus 30 °C
1	2	3	4
0,4 m	$z = 2 \cdot 10^{-8}x^4 + 1 \cdot 10^{-6}x^3 + 4 \cdot 10^{-5}x^2 + 5 \cdot 10^{-4}x + 2,7 \cdot 10^{-3}; R^2 = 0,995$	$z = -4 \cdot 10^{-4}x^2 - 2 \cdot 10^{-7}x + 1,23 \cdot 10^{-2}; R^2 = 1$	$z = 2 \cdot 10^{-8}x^4 - 1 \cdot 10^{-6}x^3 + 4 \cdot 10^{-5}x^2 - 5 \cdot 10^{-4}x + 2,7 \cdot 10^{-3}; R^2 = 0,995$
0,5 m		$z = -4 \cdot 10^{-4}x^2 + 1 \cdot 10^{-7}x + 1,13 \cdot 10^{-2}; R^2 = 1$	

3.10 lentelės pabaiga

1	2	3	4
0,6 m		$z = -4 \cdot 10^{-4}x^2 + 2 \cdot 10^{-7}x + 1,04 \cdot 10^{-2}; R^2 = 1$	
Pobalastinis sluoksnis			
AOT / PBS storis	Nuo minus 30 °C iki minus 5 °C	Nuo minus 5 °C iki plius 5 °C	Nuo plius 5 °C iki plius 30 °C
0,4 m	$z = 2 \cdot 10^{-8}x^4 + 2 \cdot 10^{-6}x^3 + 5 \cdot 10^{-5}x^2 + 6 \cdot 10^{-4}x + 3 \cdot 10^{-3}; R^2 = 0,995$	$z = -4 \cdot 10^{-4}x^2 - 1 \cdot 10^{-6}x + 1,22 \cdot 10^{-2}; R^2 = 1$	$z = 2 \cdot 10^{-8}x^4 - 2 \cdot 10^{-6}x^3 + 5 \cdot 10^{-5}x^2 - 6 \cdot 10^{-4}x + 3 \cdot 10^{-3}; R^2 = 0,995$
0,5 m		$z = -4 \cdot 10^{-4}x^2 - 1 \cdot 10^{-6}x + 1,13 \cdot 10^{-2}; R^2 = 1$	
0,6 m		$z = -4 \cdot 10^{-4}x^2 - 8 \cdot 10^{-7}x + 1,12 \cdot 10^{-2}; R^2 = 1$	
Sankasos sluoksnis			
AOT / PBS storis	Nuo minus 30 °C iki minus 5 °C	Nuo minus 5 °C iki plius 5 °C	Nuo plius 5 °C iki plius 30 °C
0,4 m	$z = 2 \cdot 10^{-8}x^4 + 2 \cdot 10^{-3}x^3 + 5 \cdot 10^{-5}x^2 + 6 \cdot 10^{-4}x + 3 \cdot 10^{-3}; R^2 = 0,995$	$z = -4 \cdot 10^{-4}x^2 - 8 \cdot 10^{-7}x + 1,16 \cdot 10^{-2}; R^2 = 1$	$z = 2 \cdot 10^{-8}x^4 - 2 \cdot 10^{-6}x^3 + 5 \cdot 10^{-5}x^2 - 6 \cdot 10^{-4}x + 3 \cdot 10^{-3}; R^2 = 0,995$
0,5 m		$z = -4 \cdot 10^{-4}x^2 - 1 \cdot 10^{-6}x + 1,08 \cdot 10^{-2}; R^2 = 1$	
0,6 m			
Natūralaus grunto sluoksnis			
AOT / PBS storis	Nuo minus 30 °C iki minus 5 °C	Nuo minus 5 °C iki plius 5 °C	Nuo plius 5 °C iki plius 30 °C
0,4 m	$z = 2 \cdot 10^{-8}x^4 + 1 \cdot 10^{-6}x^3 + 4 \cdot 10^{-4}x^2 + 5 \cdot 10^{-4}x + 2,6 \cdot 10^{-3}; R^2 = 0,995$	$z = -2 \cdot 10^{-4}x^2 - 5 \cdot 10^{-7}x + 7,1 \cdot 10^{-3}; R^2 = 1$	$z = 2 \cdot 10^{-8}x^4 - 1 \cdot 10^{-6}x^3 + 4 \cdot 10^{-5}x^2 - 5 \cdot 10^{-4}x + 2,5 \cdot 10^{-3}; R^2 = 0,995$
0,5 m	$z = 2 \cdot 10^{-8}x^4 + 1 \cdot 10^{-6}x^3 + 4 \cdot 10^{-4}x^2 + 5 \cdot 10^{-4}x + 2,5 \cdot 10^{-3}; R^2 = 0,995$	$z = -2 \cdot 10^{-4}x^2 - 5 \cdot 10^{-7}x + 6,9 \cdot 10^{-3}; R^2 = 1$	
0,6 m	$z = 2 \cdot 10^{-8}x^4 + 1 \cdot 10^{-6}x^3 + 4 \cdot 10^{-4}x^2 + 5 \cdot 10^{-4}x + 2,4 \cdot 10^{-3}; R^2 = 0,995$	$z = -2 \cdot 10^{-4}x^2 - 4 \cdot 10^{-7}x + 6,7 \cdot 10^{-3}; R^2 = 1$	$z = 2 \cdot 10^{-8}x^4 - 1 \cdot 10^{-6}x^3 + 4 \cdot 10^{-5}x^2 - 5 \cdot 10^{-4}x + 2,4 \cdot 10^{-3}; R^2 = 0,995$

Gautos standumo koeficiento reikšmės palygintos su kitų mokslininkų atliktų tyrimų rezultatais (3.28 pav.), kuriuose buvo naudojamos tokios pat arba panašios GKK veikiant riedmenų sukuriamoms apkrovoms. Pagal Lopez Pita *et al.* 2004 atlikto tyrimo rezultatus standartinio greičio linijoms (iki 160 km/h) standumo koeficientas turėtų būti 1 zonoje (50–60 kN/mm), didesnio nei 160 km/h greičio linijoms pageidaujama standumo koeficiento reikšmė turėtų būti 2 zonoje (70–80 kN/mm). Remiantis Gallego *et al.* (2011) standumo koeficiento reikšmė turėtų būti nuo 70 kN/mm iki 150 kN/mm. Li ir Berggren (2010) atlikto tyrimų metu nustatytos GKK standumo reikšmės skirtingoms GKK: 78 kN/mm – normaliai GKK, 31,6 kN/mm – minkštai GKK ir 171,5 kN/mm – itin standžiai GKK. Pritaikius Zakeri *et al.* (2016) gautas matematines išraiškas, skirtas apskaičiuoti GKK standumo koeficientus, įvertinant atstumą tarp pabėgių ir riedmenų sukuriamos apkrovos dydį, optimali standumo koeficiento reikšmė turėtų būti 65 kN/mm. Skaitiškai sumodeliuotų GKK su skirtingais PBS storiais (0,4 m, 0,5 m ir 0,6 m)

gautos standumo koeficientų reikšmės, priklausančios nuo kvazistatinės riedmenų sukuriamos apkrovos ir sluoksnių temperatūros patvirtina kitų autorių rekomenduotinas GKK standumo koeficiento reikšmes, kai GKK sluoksnių temperatūra yra intervaluose nuo minus 30 °C iki minus 2 °C ir nuo plus 2 °C iki plus 30 °C. Gautos standumo koeficiento reikšmės sluoksnių temperatūrų intervale nuo minus 2 °C iki plus 2 °C, netenkina ir tampa kritinėmis. Esant GKK sluoksnių temperatūrai lygiai 0 °C, kai GKK PBS storis 0,4 m standumo koeficientas 12,3 kN/mm, PBS storiui 0,5 m – 13,68 kN/mm, PBS storiui 0,6 m – 14,92 kN/mm, t. y. artėjant GKK sluoksnių temperatūrai nuo plus/minus 2 °C iki 0 °C standumo koeficientas gali sumažėti apie 20 kN/mm ir tapti iki 38 % mažesnis, nei pageidaujamas. Šis sumažėjimas gali būti tik tada, kai PBS storis parinktas netinkamas arba PBS neatlieka savo apsauginių funkcijų sankasos sluoksniui ir leidžia sankasos sluoksniui pasiekti 0 °C.



3.28 pav. Visos geležinkelio kelio konstrukcijos standumo koeficientų priklausomybės nuo temperatūros sluoksniuose, kai naudojamas skirtingas pobalastinio sluoksnio storis:

- 1 – geležinkelio kelio konstrukcijos standumo koeficientų reikšmės geležinkelio keliams, kai greitis mažesnis nei 160 km/h;
- 2 – geležinkelio kelio konstrukcijos standumo koeficientų reikšmės geležinkelio keliams, kai greitis didesnis nei 160 km/h

Fig. 3.28. Stiffness coefficients of the whole railway track construction when different thicknesses of sub-ballast were used and changing temperature of railway track construction layers: 1 – stiffness coefficients of railway track, then speed is lower than 160 km/h; 2 – stiffness coefficients of railway track, then speed is greater than 160 km/h

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. BS rengti skirta granito skalda krovimo, transportavimo ir klojimo technologinio proceso metu įrengiant BS turi tendenciją smulkėti. Jos granulimetrinės sudėties variacija padidėja. BS granitinės skaldos technologinio proceso etapais pilnutinės išbiros per 50 mm laboratorinį sieta aritmetiniai vidurkiai: TJ (62,08 %), SK (66,98 %), V (64,33 %) ir GKK (60,87 %). BS granitinės skaldos pilnutinių išbirų per sietus standartiniai nuokrypiai skirtingais technologiniais etapais lygūs: TJ (9,00 %), SK (10,99 %), V (14,76 %) ir GKK (16,03 %), nors jos statistiškai nesiskyrė.
2. Pagamintas MMM (KG1), skirtas rengti PBS krovimo, transportavimo, klojimo ir tankinimo technologinio proceso metu turi tendenciją smulkėti, jo granulimetrinės sudėties variacija padidėja. Pilnutinės išbiros per sietus didžiausias standartinis nuokrypis MMM (KG1) imties, paimtos iš sandėliavimo krūvos, buvo 4,5 %, o paimtos iš PBS padidėjo iki 6,1 % ir statistiškai skyrėsi su tikimybe 0,10. Abiejų imčių MMM (KG1) tankio ir pralaidumo vandeniui standartiniai nuokrypiai statistiškai buvo vienodi.
3. Apskaičiuotas BS skirtos granitos skaldos ir PBS skirto MMM (KG1) mažiausias reprezentatyvių imčių, reikalingų nustatyti fizinėms–mechaninėms savybėms, skaičius rodo, kad daugiau atskirųjų ėminių reikia imti iš GKK nei iš jų gamybos vietos, t. y. TJ. Apibrėžtas imčių skaičius leidžia žinoti mažiausią tiriamų medžiagų reprezentatyvių imčių skaičių, iš kurių nustatytos medžiagų skaitinėmis reikšmėmis galima pasikliauti.
4. Iš eksperimentinio stendo (DRETM II) ir laboratorinių tyrimų duomenų bei Lietuvos hidrometeorologijos stoties duomenų sumodeliuoti GKK fizikiniai procesai. Nustatyta GKK sluoksnių temperatūros kaita esant kin tamam sniego dangos storiui ir be jo. Esant didžiausiam sniegos dangos storiui (0,05 m) įšalo gylių skirtumas buvo apie 0,015 m lyginant tą pačią konstrukciją su ir be sniego dangos. Didžiausias skirtumas (1,2 °C) gautas BS paviršiuje 24 dieną, BS viduryje skirtumas buvo 1 °C, o BS ir PBS sluoksnių riboje skirtumas siekė 0,6 °C. Kuo žemesnė AOT, tuo ant BS esančios sniego dangos įtaka visiems geležinkelio kelio sluoksniams yra mažesnė.
5. ANSYS programa skaitiškai sumodeliuoti GKK didžiausi vertikalūs poslinkiai gauti visose GKK, kada GKK sluoksnių temperatūra buvo 0 °C. Visos GKK didžiausias vertikalus poslinkis gautas 0,0732 m, kai naudojamas PBS storis 0,4 m, kai PBS storis 0,5 m – 0,0658 m, kai PBS storis 0,6 m – 0,0603 m. GKK labiausiai vertikalčiai deformatyvi pavasario, rudens ir žiemos periodais, kada AOT dažniausiai lemia GKK sluoksnių 0 °C temperatūros pasikartojimus.

Bendrosios išvados

1. Atlikus mokslinių darbų analizę, išanalizavus kitų mokslininkų naudojamus metodikas ir skaitinius modelius nustatyta, kad GKK silpniausia sudedamoji dalis yra BS ir PBS. Šie sluoksniai įrengti iš biriųjų medžiagų lemia netolygų riedmenų sukuriamų apkrovų pasiskirstymą į GKK. Skaitiniai modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatai parodė, kad GKK sluoksnių medžiagų kokybė, sluoksnių įrengimo technologija, tarša dalelėmis, sukelta sluoksnius sudarančių medžiagų dėvėjimosi metu ir AOT bei vandens/drėgmės kiekis sluoksniuose yra veiksniai sparčiausiai trumpinantys GKK gyvavimo ciklą.

2. Atlikus BS skirtos granitos skaldos ir PBS skirto MMM (KG1) fizinių ir mechaninių savybių nustatymą skirtingais technologinio proceso etapais, pastebėta šių savybių variacija, kuri, naudojant matematinės statistikos metodus, įvertinta kiekybiškai. Granuliometrinės sudėties sklaidai vertinti pasiūlyta naudoti iš regresijos lygties gautą didžiausią pilnutinės išbiros per sietus standartinį nuokrypį, kuris įprastai būna to dydžio grūdelių, kurie mišinyje sudaro 50–70 % jo masės. Ši didžiausia standartinio nuokrypio reikšmė leidžia palyginti skirtingo stambumo ir nevienodumo (homogeniškumo) biriąsias medžiagas. Šis būdas leidžia vienu skaičiumi (didžiausiu standartiniu nuokrypiu) įvertinti bet kurio biraus mišinio granuliometrinės sudėties variacijos didumą, skirtingais gamybos, transportavimo, sandėliavimo ir klojimo technologinių procesų etapais.

3. Sukurti Lietuvos Respublikoje projektavimo norminiuose dokumentuose naudojamų ir naudotinių skirtingų GKK profilių virtualūs modeliai „SV HEAT“ programinio paketo aplinkoje, kurie leidžia vertinti neigiamą klimato ir naudojamų GKK įrengti medžiagų poveikį GKK hidroterminiams režimams. Virtualūs modeliai leidžia tiksliau įvertinti aplinkos oro veiksnių įtaką GKK vykstantiems fizikinims procesams, todėl ŠR žemėlapių galima atsiskaityti.

4. Remiantis slovakiškąja patirtimi nustatyti Lietuvos Respublikoje naudojamų ir naudotinių skirtingų GKK skersinių profilių hidroterminiai režimai, 2013–2015 metais ir pastarųjų 50 metų šalčiausiais periodais. Esant didžiausiam sniegos dangos storiui (0,05 m) įšalo gylių skirtumas buvo apie 0,015 m lyginant tą pačią konstrukciją su ir be sniego dangos. Skaitiškai modeliuojant šaltąjį periodą, didžiausias skirtumas (1,2 °C) gautas BS paviršiuje 24 dieną, BS viduryje skirtumas buvo 1 °C, o BS ir PBS riboje skirtumas siekė 0,6 °C. Kuo žemesnė AOT tuo, ant BS esančios sniego dangos įtaka visiems geležinkelio kelio sluoksniams yra mažesnė.

5. Sukurtas ANSYS programoje modelis, skirtas kompleksiskai vertinti AOT ir riedmenų sukuriamoms apkrovoms, įvertinant GKK sluoksniuose esančių konstrukcinių medžiagų, oro ir vandens kiekio savybės bei pritaikytas dinaminės riedmenų jėgos konvertavimas į kvazistatinę jėgą, eliminuojančią dinaminių modelių (dinaminės jėgos) vertinimo netikslumus – netolygius geležinkelio kelio komponentų (bėgių, pabėgių, padų) ir riedmenų mechaninių, fizinių, sąlyčio zonos ir formos rodiklius, įtakojančius didžiausius vertikalios poslinkius.

6. Skaitiškai sumodeliuotų GKK gautos standumo koeficientų reikšmės, priklausančios nuo riedmenų sukuriamos apkrovos ir GKK sluoksnių temperatūros, kai ji yra intervaluose nuo minus 30 °C iki minus 4 °C ir nuo plus 4 °C iki plus 30 °C, patvirtina kitų autorių tyrimų gautas ir rekomenduotinas GKK standumo koeficiento reikšmes. Gautos standumo koeficientų reikšmės, kai GKK sluoksnių temperatūra nuo minus 4 °C iki plus 4 °C, neatitinka kitų mokslininkų gautų reikšmių ir tampa kritinės. Esant sluoksnių temperatūrai lygiai 0 °C, kai GKK PBS storis 0,4 m standumo koeficientas 12,3 kN/mm, PBS storiui 0,5 m – 13,68 kN/mm, PBS storiui 0,6 m – 14,92 kN/mm, t. y. artėjant AOT nuo plus/minus 4 °C iki 0 °C standumo koeficientas gali tapti iki 72 % mažesnis, nei leidžiamas. Kompleksinis riedmenų ir aplinkos veiksnių neigiamas poveikis būtų sumažinamas tiksliai įvertinus GKK įšalo gylių. Šis įvertinimas leistų tiksliau parinkti GKK konstrukcines medžiagas ir PBS storį, leidžiančius sumažinti GKK įšalo gylių, dėl ko kritiškai sumažėja GKK standumo koeficientas.

Literatūra ir šaltiniai

AB „Lietuvos geležinkeliai“. 2013. *Metinė ataskaita*. Vilnius, Lietuva. 41p. [žiūrėta 2014 vasario 13 d.]. Prieiga per internetą: http://www.litrail.lt/documents/10291/19071/LT_19.05_www.pdf/052d58f4-c704-4df5-b288-4e1a6d081295

AB „Lietuvos geležinkeliai“. 2014. *Infrastruktūra* [žiūrėta 2017 sausio 8d.]. Prieiga per internetą: <http://infrastructure.litrail.lt/infrastruktura>

AB „Lietuvos geležinkeliai“. 2017. *2017 metų šešių mėnesių tarpinis pranešimas*. Vilnius, Lietuva. 14p. [žiūrėta 2018 vasario 21 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.litrail.lt/documents/10279/5289061/AB+LG+2017+m.+6+m%C4%97n.+arpinis+prane%C5%A1imas+2017-09-12/3905cac1-09b4-4a17-8fda-5b636c43ff51?version=1.0>

Aikawa, A. 2013. Determination of dynamic ballast characteristics under transient impact loading, *Electronic Journal of Structural Engineering* 13(1): 17–34

Aikawa, A. 2015. Dynamic characterization of a ballast layer subject to traffic impact loads using free-dimensional sensing stones and special sensing sleeper, *Construction and Building Materials* 92: 23–30. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.005

Alexandrou, G.; Kouroussis, G.; Verlinder, O. 2016. A comprehensive prediction model for vehicle/track/soil dynamic response due to wheel flats, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 230 (4): 1088–1104. doi:10.1177/0954409715576015

Al Shaer, A.; Duhamel, D.; Sab, K.; Forêt, G.; Schmitt, L. 2008. Experimental settlement and dynamic behavior of a portion of ballasted railway track under high speed trains, *Journal of Sound and Vibration* 316(1): 211–233

Andrade, A.R.; Teixeira, P.F. 2012. A Bayesian model to assess rail track geometry degradation through its life-cycle, *Research in Transport Economics* 36: 1–8. doi:10.1016/j.retrec.2012.03.011

Andrey, J.; Mills, B. 2003. Climate change and the Canadian transport system: vulnerabilities and adaptations: Monograph. University of Waterloo, Waterloo, Canada. 55p.

Antov, D.; Smirnovs, J. 2016. Improving road safety in the Baltic states – role of strategies, *Injury Prevention* 22(2): A30–A30. doi:10.1136/injuryprev-2016-042156.78

Apsauginio sankasos sluoksnio įrengimo instrukcija. (275/K) (patvirtinta AB „Lietuvos geležinkeliai“ genrealinio direktoriaus 2013 rugsėjo 6 d. įsakymu Nr. Į-827), Vilnius: UAB „Geležinkelių projektavimas“, 2013. 110 p. (in Lithuanian)

Arasteh khouy, I.; Larsson-Kraik, P.; Nissen, A.; Juntti, U.; Schunnesson, H. 2014^a. Optimisation of track geometry inspection interval, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 228 (5): 546–556. doi:10.1177/0954409713484711

Arasteh khouy, I.; Schunnesson, H.; Juntti, U.; Nissen, A.; Larsson-Kraik, P. 2014^b. Evaluation of track geometry maintenance for a heavy haul railroad in Sweden: A case study, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 228 (5): 496–503. doi:10.1177/0954409713482239

Aursudkij, B. 2007. A Laboratory Study of Railway Ballast Behaviour under Traffic Loading and Tamping Maintenance, PhD Thesis, University of Nottingham, United Kingdom 235 p.

Awoleye, E. O. A. 1993. Ballast type-ballast life predictions. British Rail Research Report LR CES 122, Derby, UK; British Rail.

Bai, L.; Liu, R.; Sun, Q.; Wang, F.; Xu, P. 2015. Markov – based model for the prediction of railway track irregularities, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 229 (2): 150–159. doi:10.1177/0954409713503460

Berdenikov, V. P. 1955. Carrying out observations of ice jams. *Metodicheskie ukazaniya upravleniyam gidrometsluzhby (Methodical Instructions for the hydro-meteorological service)*. Leningrad. Gidrometeoizdat (GUGMS, GGI) (43)

Berghold, A.; Veit, P. 2013. Track service life – driven by ballast quality in *1st Railway Track Science and Engineering International Workshop – Ballast: Issues and Challenges. UIC Paris 2013*

Berggren, E. 2009. *Railway track stiffness: dynamic measurements and evaluation for efficient maintenance*: Doctoral dissertation thesis. KTH, School of Engineering Sciences (SCI), Aeronautical and Vehicle Engineering, Stockholm, Sweden. 31 p.

Bertulienė, L.; Laurinavičius, A. 2008. Research and evaluation of methods for determining deformation modulus of road subgrade and frost blanket course, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 3(2): 71–76. doi:10.3846/1822-427X.2008.3.71-76.

Bertulienė, L.; Laurinavičius, A.; Vaitkus, A. 2010. Research and evaluation of methods for determining deformation modulus of a base course of road pavement, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 5(2): 110–115. doi:10.3846/bjrbe.2010.16

Bing, A.J.; Gross, A. 1983. Development of railway track degradation models, *Journal of the Transportation Research Board* 939: 27–31

Bragov, L.; Igumnov, A.; Konstantinov, A.; Lomunov, A.; Filippov, Y.; Shmotin, R.; Didenko, Krundaeva, A. 2015. Investigation of strength properties of freshwater ice, *DYMAT 2015 – 11th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading* 94. doi:10.1051/epjconf/20159401070

Broadbent, R. A.; Thompson, D. J.; Jones, C. J. C. 2009. Evaluation of the effects of temperature on railpad properties, rail decay rate and noise radiation, *The Sixteen International Congress on Sound and Vibration* 1–8

Bogdevičius, M.; Žygienė, R. 2017. Research of System Vehicle-Track when Wheel is Scaled, *Procedia Engineering* 187: 599–603. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.419

Bogdevičius, M.; Žygienė, R.; Bureika, G.; Dailydka, S. 2016. An analytical mathematical method for calculation of the dynamic wheel-rail impact force caused by wheel flat, *Vehicle system dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility* 54(5): 689–705. doi:10.1080/00423114.2016.1153114

Bogdevičius, M.; Žygienė, R.; Dailydka, S.; Bartulis, V.; Skrickij, V.; Pukalskas, S. 2015. The dynamic behaviour of a wheel flat of a railway vehicle and rail irregularities, *Transport* 30(2): 217–232. doi:10.3846/16484142.2015.1051108

Bulevičius, M.; Petkevičius, K.; Čirba, S. 2013. The influence of geometric parameters on strength properties of the aggregates used to produce asphalt mixtures, *Journal of Civil Engineering and Management* 19(6): 894–902. doi:10.3846/13923730.2013.858645

Bureika, G.; Gaidamauskas, E.; Kupinas, J.; Bogdevičius, M.; Steišūnas, S. 2017. Modelling the assessment of traffic risk at level crossings of Lithuanian railways, *Transport* 32(3): 282–290. doi: 10.3846/16484142.2016.1244114

Burrow, M. P. N.; Bowness, D.; Ghataora, G. S. 2007. A comparison of railway track foundation design methods, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 221(1): 1–12. doi: 10.1243/09544097JRRRT58

Caetano, L. F.; Teixeira, P. F. 2016. Predictive maintenance model for ballast tamping, *Journal of Transportation Engineering* 142(4): 04016006. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000825

Casagrande, A. 1953. Theories and hypotheses of general character – soil properties, classification, engineering geology, *Proceedings of the Third International Conference on*

Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, Switzerland, Imprimerie Berichthaus. 2: 307–312

Casagrande, A. 1975. Liquefaction and cyclic deformation of sands, a critical review, *Proceedings of the Fifth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: Buenos Aires*, Sociedad Argentina de Mecanica de Suelos e Ingenieria de Fundaciones, 5: 80–109

Cecilia, V.; Isabel, M. R.; Rui, C. 2012. Integer programming to optimize tamping in railway tracks as preventive maintenance, *Journal of Transportation Engineering* 138(1): 123–131. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000296

Cenek, P. D.; Kean, R. J.; Kvatch, I. A.; Jamieson, N. J. 2012. Freight transport efficiency: a comparative study of coastal shipping, rail and road modes, *NZ Transport Agency research report 497*. 61p. [žiūrėta 2017 rugsėjo 27 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/497/docs/497.pdf>

Chebli, H.; Clouteau, D.; Schmitt, L. 2008. Dynamic response of high-speed ballasted railway tracks: 3D periodic model and in situ measurements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28(2): 118–131

Chen, C.; McDowell, G. R. 2016. An investigation of the dynamic behaviour of track transition zones using discrete modelling, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 230(1): 117–128. doi:10.1177/0954409714528892

Cho, D. I.; Parlar, M. 1991. A survey of maintenance models for multi-unit systems. *European Journal of Operational Research* 51: 1–23

Connolly, D. P.; Kouroussis, G.; Laghrouche, O.; Ho, C. L.; Forde, M. C. 2015. Benchmarking railway vibrations – Track, vehicle, ground and building effects, *Construction and Building Materials* 92: 64–81. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.07.042

Conover, W. J. 1999. *Practical Nonparametric Statistics*. Third Edition, John Wiley&Sons, Inc New York. 428–433

Construction Review oficiali svetainė. 2015. Tamping machine feature, components and functions. [žiūrėta 2017 rugsėjo 30d.]. Prieiga per internetą: <https://constructionreviewonline.com/2015/09/tamping-machine-features-components-and-functions/>

Counter, B.; Abu-Tair, A.; Franklin, A.; Tann, D. 2015. Refurbishment of ballasted track systems; the technical challenges of quality and decision support tools, *Construction and Building materials* 92: 51–57. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.11.036

Costa, P. A.; Calçada, R.; Cardoso, A. S.; Bodare, A. 2010. Influence of soil non-linearity on the dynamic response of high-speed railway tracks, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30(4): 221–235

Cui, Y.; Duong, T. V.; Tang, A. M.; Dupla, J. C.; Calon, N.; Robinet, A. 2013. Investigation of the hydro-mechanical behaviour of fouled ballast, *Journal of Zhejiang University* 14(4): 244–255

Dahlberg, T. 2001. Some railroad settlement models – a critical review, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Rail and Rapid Transit* 215 (4): 289–300. doi:10.1243/0954409011531585

Dahlberg, T. 2003. *Railway track settlements – a literature review*, Report for the EU project SUPERTRACK, 42 p.

Dekker, R. 1996. Applications of maintenance optimization models: a review and analysis, *Reliability Engineering and System Safety* 3(51): 229–240

Dekker, R.; Wildeman, R. E.; Van der Duyn Schouten, F. A. 1997. A review of multi-component maintenance models with economic dependence, *Mathematical Methods of Operations Research* 3(45): 411–435

DIN-Taschenbuch 113, Erkundung des Baugrunds. 1998. *Bestimmung der Korngroessenverteilung DIN 18 123-1*, DIN e.V., Wiesbaden, S. 273–284

DIN-Taschenbuch 113, Erkundung des Baugrunds. 1998. *Bestimmung des Wasserdurchlaessigkeitsbeiwerts-teil 1: Laborversuch. DIN 18 130-1*, DIN e.V., S. 336–355

Dižo, J.; Steišūnas, S.; Blatnický, M. 2016. Simulation analysis of the effects of a rail vehicle running with wheel flat, *Manufacturing technology: journal for science, research and production* 16(5): 889–896

Dižo, J.; Steišūnas, S.; Blatnický, M. 2015. Rail vehicle motion smoothness analysis with damaged wheel, *Railway transport and logistics: scientific and technical journal about railway transport, the logistics and management* 11(2): 4–9

Doll, C.; Trinks, C.; Sedlacek, N.; Pelikan, V.; Comes, T.; Schultmann, F. 2014. Adapting rail and road networks to weather extremes: case studies for southern Germany and Austria, *Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards* 72(1):63–85. doi:10.1007/s11069-013-0969-3

Drozdziel, J.; Sowinski, B. 2010. Method of track vertical stiffness estimation based on experiment, *The Archives of Transport* 22(2): 153–162. doi:10.2478/v10174-010-0009-y

Drozdziel, J.; Sowinski, B.; Szulczyk, A. 2011. Equivalent track stiffness determination, *19th International Scientific and Technical Conference on Transport, Road-building, Agricultural, Hoisting & Hauling and Military Technics and Technologies*, June 29–July 7, Varna, Bulgaria, 3: 16–18

DS 836 Deutsche Bundesbahn, Vorschrift für Erdbauwerke, VE, 1999

Duong, T. V.; Tang, A. M.; Cui, Y. J.; Dupla, J. C.; Canou, J.; Calon, N.; Robinet, A. 2013. The interaction between ballast and underlying layer in railway sub-structure in *1st Railway Track Science and Engineering International Workshop – Ballast: Issues and Challenges. UIC Paris 2013*

Esmaeili, M.; Amiri, S.; Jadidi, K. 2014. An investigation into the use of asphalt layers to control stress and strain levels in railway track foundations, *Journal of rail and rapid transit. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 225(2): 182–193. doi:10.117/0954409712468850

Esmaeili, M.; Rezaei, N. 2016, In situ impact testing of a light-rail ballasted track with tyre-derived aggregate subballast layer, *International Journal of Pavement Engineering* 17(2): 176–188. doi:10.1080/10298436.2015.1007226

European Asphalt Pavement Association. 2003. *Asphalt in railway tracks, Report, European Asphalt Pavement Associations*. Belgija, Bruselis. [žiūrėta 2016 vasario 18 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.eapa.org/publications.php?c=90>

European Commition oficiali svetainė. *Trans-European Transport Network TENtec*. [žiūrėta 2017 rugpjūčio 8 d.]. Prieiga per internetą: <http://ec.europa.eu/transport/infrastructure/tentec/tentec-portal/site/en/innovation.html>

Fernandes, G.; Palmeira, E. M.; Gomes R. C. 2008. Performance of geosynthetic-reinforced alternative sub-ballast material in a railway track, *Geosynthetics International* 15(5): 311–321. doi:10.1680/gein.2008.15.5.311

Galbraith, R. M.; Price, D. J.; L. S. (ed.). 2005. Scottish Road Network Climate Change Study, Glasgow, The Scottish Government. 107p. [žiūrėta 2017 rugpjūčio 8 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.gov.scot/Publications/2005/07/08131510/15117>

Gallego, I.; Muñoz, J.; Rivas, A.; Sánchez-Cambronero, S. 2011. Vertical track stiffness as a new parameter involved in designing high-speed railway infrastructure, *Journal of Transportation Engineering* 137(12): 971–979. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000288

Gallego, I.; Munoz, J.; Sánchez-Cambronero, S.; Rivas, A. 2013. Recommendations for numerical rail substructure modeling considering nonlinear elastic behavior, *Journal of Transportation Engineering* 139(8): 848–858. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000560

Gao, S. R.; Wu, Q. B. 2015. Period analysis and trend forecast for soil temperature in the Qinghai–Xizang Highway by wavelet transformation, *Environmental Earth Science* 74: 2883–2891

Giner, G. I.; Lopez Pita, A. 2009. Numerical simulation of embankment – structure transition design, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 223(4): 331–343. doi:10.1243/09544097JRRT234

Giner, G. I.; Alvarez, R. A.; Garcia-Moreno, S. C. S.; Camacho, L. J. 2016. Dynamic modelling of high speed ballasted railway tracks: analysis of the behavior, *XII Conference on Transport Engineering*, CIT 2016, Valencia, Spain. doi:10.4995/CIT2016.2016.4218

Gold, L. W. 1958. Some observations on the dependence of strain on stress for ice, *Canadian Journal of Physics* 36(10): 1265–1275

Gold, L. W. 1994. The elastic modulus of columnar-grain fresh-water ice, *Annals of Glaciology* 19: 13–18. doi:10.1017/S0260305500010922

Gold, L. W.; Jones, S. J.; Slade, T. D. 1992. A comparison of crack initiation conditions for columnar-grain and granular ice, *Eleventh international Symposium on Ice Problems* 1: 15–19

Gold, L. W.; Traetteberg, A. 1975. Young's modulus of ice and ice engineering problems, *Second Symposium, Applications of Solid Mechanics* 1:1–16

Gu, G.; Choi, J. 2013. The dynamic response of rail support, *Vehicle System Dynamics* 51(6): 798–820. doi: 10.1080/00423114.2013.778415

Guler, H. 2014 Prediction of railway track geometry deterioration using artificial neural networks: a case study for Turkish state railways, *Structure and Infrastructure Engineering* 10(5): 614–626. doi:10.1080/15732479.2012.757791

Haddani, Y.; Saussine, G.; Gourvès, R. 2013. Field ballast granulometry assessment thanks to image analysis in *1st Railway Track Science and Engineering International Workshop – Ballast: Issues and Challenges. UIC Paris 2013*. Available at: <http://www.rtse-workshops.org/>

Hall, L. 2003. Simulations and analyses of train-induced ground vibrations in finite element models, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 23(5): 403–413. doi:10.1016/S0267-7261(02)00209-9

Han, J.; Thakur, K. J. 2014. Sustainable roadway construction using recycled aggregates with geosynthetics, *Sustainable Cities and Society* 14: 342–350. doi: 10.1016/j.scs.2013.11.011

Harvey, M.; Whetton, P.; McInnes, K. L.; Cechet, B.; McGregor, J. L.; Nguen, K.; Houghton, N.; Lester, C.; Styles, E.; Michael, N. 2004. Impact of climate change on road infrastructure. Austroads, Report no. AP-R243/04, Austroads and the Bureau of Transport and Regional Economics, Sydney

Heydari, M.; Alizadeh, B.; Yarahmadi, B. R.; Ghiasvand, S. 2015. Evaluate th efficiency of machines for mechanized rail line infrastructure, *Current World Environment* 10(1): 1072–1082. doi:10.12944/CWE.10.Special-Issue1.127

Hodas, S.; Išvolt, L.; Dobeš, P. 2016. Preliminary results and conclusions from mathematical modelling of thermal regime of railway track structure, *International journal of computational methods and experimental measurements* 4(2): 69–79. doi:10.2495/CMEM-V4-N2-69-79

Howard, D. M.; Angus, J. A. S. 2009. Acoustics and psychoacoustics, Fourth Edition. Focal Press. 488 p. [žiūrėta 2017 gegužės 7 d.]. Prieiga per internetą: http://www.pearl-hifi.com/06_Lit_Archive/14_Books_Tech_Papers/Howard_D-Angus_J/Acoustics_and_Psychoacoustics_4th_Edn.pdf

Huang, H.; Tutumluer, E. 2014. Image-aided element shape generation method in discrete-element modeling for railroad ballast, *Journal of Materials in Civil Engineering* 26(3): 527–535. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000839

IEA. 2016. World Energy Outlook 2016, 684 p. [žiūrėta 2017 rugpjūčio 18 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/transportation.pdf>

IFEU; SGKV. 2002. Comparative Analysis of Energy Consumption and CO Emissions of Road Transport and Combined Transport Road/Rail, *A Scientific Study*. 16 p. [žiūrėta 2016

rugsėjo 2 d.]. Prieiga per internetą: https://www.iru.org/apps/cms-filesystem-action?file=PPP/en_Comparative-study-CO2.pdf

Indraratna, B.; Ionescu, D.; Christie, H.D. 1998. Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 124 (5): 439–449

Indraratna, B.; Nimbalkar, S. 2013. Stress-strain degradation response of railway ballast stabilized with geosynthetics, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139(5): 684–700. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000758

Indraratna, B.; Nimbalkar, S.; Coop, M.; Sloan, S.W. 2014. A constitutive model for coal-fouled ballast capturing the effects of particle degradation, *Computers and Geotechnics* 61: 96–107. doi:10.1016/j.compgeo.2014.05.003

Indraratna, B.; Salim, W.; Rujikiatkamjorn, C. 2011. Advanced rail geotechnology – ballasted track. CRC Press, London 432 p.

Indraratna, B.; Thakur, P. K.; Vinod, J. S. 2010. Experimental and numerical study of railway ballast behavior under cyclic loading, *International Journal of Geomechanics* 10(4): 136–144. doi:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000055

International Union of Railways, UIC. 1984. *Earthworks and track bed construction for railway lines*, UIC 719. Paris, France

International Union of Railways. 1994. *Earthworks and track-bed layers for railway lines*, UIC Code:719R. 141 p.

Ižvolt, L. 2008. Railway substructure – stress, diagnostics, design and implementation of body construction layers of railway subgrade. (Monografija). University of Žilina.

Ižvolt, L.; Dobeš, P.; Pitonak, M. 2017. Preliminary results and conclusions from the experimental monitoring of thermal regime of railway track structure, *International Journal of Transport Development and Integration* 1(3): 529–539

Ižvolt, L.; Dobeš, P.; Pultnerová, A. 2016. Monitoring of moisture changes in the construction layers of the railway substructure body and its subgrade, *Procedia Engineering* 161: 1049–1056. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.847>

Janardhanam, R.; Desai, C.S. 1983. Three-dimensional testing and modeling of ballast, *Journal of Geotechnical Engineering* 109(6): 783–796. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1983) 109:6(783)

Juknevičiūtė, L.; Laurinavičius, A. 2008. Analysis of the change in the depth of frozen ground in different soils under Lithuanian conditions, in *Proceedings of the 7th International Conference “Environmental Engineering”*: selected papers, vol. 3. Ed. By Čygas, D.; Froehner, K. D. May 22–23, 2008, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 1160–1161

Kaewunruen, S.; Remennikov, A.M. 2007. Field trials for dynamic characteristics of railway track and its components using impact excitation technique, *NDT&E International* 40(7): 510–519

Kausel, E. 1994. Thin-layer method: formulation in the time domain, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37(6): 927–941

Kennedy, J.; Woodward, P.K.; Medero, G.; Banimahd, M. 2013. Reducing railway track settlement using three-dimensional polyurethane polymer reinforcement of the ballast, *Construction and Building Materials* 44:615–625. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.03.002

Klavins, M.; Rodinov, V. 2010. Influence of large-scale atmospheric circulation on climate in Latvia, *Boreal environment research* 15: 533–543

Klotzinger E. 2008^a. Der Oberbauschotter T1.1: *Anforderungen und Beanspruchung*. *Eisenbahntechnische Rundschau*, ½, 34–41. Vokietija

Klotzinger E. 2008^b. Der Oberbauschotter T1.2: *Qualitätsverlauf und Eingriffsschwellen*. *Eisenbahntechnische Rundschau*, ½, 120–125. Vokietija

Knothe, K.; Wu, Y. 1998. Receptance behaviour of railway track and subgrade, *Archive of Applied Mechanics* 68(7-8): 457–470. doi: 10.1007/s0041900050

Kupčuliak, P. 2011. Návrh a posúdenie konštrukcie podvalového podlažia z aspektu zaťaženia klimatickými faktormi. ŽU Žilina, (Daktaro disertacija). SvF, ŽU v Žiline, 09/2011

Kuo, W.; Prasad, V.R. 2000. An annotated overview of system-reliability optimization, *IEEE Transactions on Reliability* 2(49): 176–187

Lankhourst Mouldings. 2015. Analysis and comparison of sleeper parameters and the influence on track stiffness and performance, *Railway engineering 2015 – 13th International Conference and Exhibition*, Edinburg, Scotland. [žiūrėta 2018 vasario 27 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.lankhorstrail.com/en/railroad-ties>

Laurinavičius, A.; Čygas, D.; Čiuprinskas, K.; Juknevičiūtė, L. 2007. Data analysis and evaluation of road weather information system integrated in Lithuania, *The Baltic Bridge of Road and Bridge Engineering* 2(1): 5–11

Laurinavičius, A.; Čygas, D.; Vaitkus, A.; Ratkevičius, T.; Bulevičius, M.; Mučinis, D.; Baltrušaitis, A. 2016. Research of snow melting materials performance efficiency for road winter maintenance, *Transport* 31(3): 322–332

Laurinavičius, A.; Juknevičiūtė-Žilinskienė, L. 2011. Eleven years of RWIS operation in Lithuania: possibilities for the use of the data collected, *The 8th International Conference "Environmental Engineering"* May 19–20, Vilnius, Lithuania: 1108–1112

Lekarp, F.; Isacson, U.; Dawson, A. R. 2000. State of the Art. I: Resilient modulus response of unbound aggregates, *Journal of Transportation Engineering* 126(1): 66–75. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:1(66)

Leshchinsky, B; Ling, I.H. 2013. Numerical modeling of behavior of railway ballasted structure with geocell confinement, *Geotextiles and Geomembranes* 36: 33–43. doi:10.1016/j.geotexmem.2012.10.006

Li, M.X.D.; Berggren, E.G. 2010. A study of the effect of global track stiffness and its variations on track performance: simulation and measurement, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 224 (5): 375–382. doi:10.1243/09544097JRRT361

Li, W.; Bian, X. 2016. Dynamic performance of pile-supported bridge-embankment transition zones under high-speed train moving loads, *Procedia Engineering, Advances in Transportation Geotechnics 3. The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics* 143: 1059–1067

Li, H.; Zhang, Q.; Zhao, J. 2016. Rock Dynamics: From Research to Engineering, *Proceeding of the 2nd International Conference on Rock Dynamics and Applications*, 568

Lietuvos statistikos departamentas. [žiūrėta 2018 vasario 20 d.]. Prieiga per internetą: <https://osp.stat.gov.lt/statistiniu-rodikliu-analize?indicator=S7R211#/>

Lichtberger, B. 2011. *Manual de vía: Eurailpress*, DVV Media Group. 28p.

Lingaitienė, O.; Lingaitis, V. 2006. Use of an expenditure reducing model in railway carriage, *Transport* 21(1): 53–55

Liu, X.; Rapik Saat, M., Barkan C. P. L. 2012. Analysis of Causes of Major Train Derailment and Their Effect on Accident Rates, *Transportation Research Record* 2289: 154–163. doi:10.3141/2289-20

Lysmer, J.; Kuhlemeyer, R. L. 1969. Finite dynamic model for infinite media, *Journal of the Engineering Mechanics Division* 95(4): 859–877

Lopez Pita, A.; Teixeira, F. P.; Robuste, F. 2004. High speed and track deterioration: the role of vertical stiffness of the track, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 218(1): 31–40. doi:10.1243/095440904322804411

Lopez-Pita, A.; Teixeira, P. F.; Casas, C.; Bachiller, A.; Ferreira, P. A. 2008. Maintenance costs of high-speed lines in Europe, *Journal of the Transport Research Board* 2043: 13–19. doi:10.1016/j.retrec.2012.03.011

LST EN 933-1:2012. *Bandymai užpildų geometrinėms savybėms nustatyti. 1 dalis. Granuliometrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas*

LST EN 1097-1:2011. *Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo metodai. 1 dalis. Atsparumo dėvėjimuisi nustatymas (mikro-Devalio metodas)*

LST EN 1097-2:2010. *Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo metodai. 2 dalis. Atsparumo trupinimui nustatymo metodai*

LST EN 1097-6:2013. *Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo metodai. 6 dalis. Dalelių tankio ir įmirkio nustatymas*

LST EN 1331: 2015. *Soils for use in road construction – Classification*

LST 1360.6:1995 *Automobilių kelių gruntai. Bandymo metodai. Grunto tankio nustatymas*

LST EN 13286-2:2004. *Birieji ir hidrauliniai rišikliai sujungti mišiniai. 2 dalis. Laboratoriniai sausojo tankio ir drėgnio nustatymo metodai. Proktoro tankinimas.*

LST EN ISO 13370: 2000 *Šiluminės pastatų charakteristikos. Šilumos perdavimas gruntu. Apskaičiavimo metodai (ISO 13370:1998)*

LST EN 13450: 2013. *Aggregates for railway ballast*

LST EN ISO 14688-2:2004. *Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Gruntų atpažintis ir klasifikavimas. 2 dalis. Klasifikavimo principai (ISO 14688-2:2004)*

LST CEN ISO/TS 17892-11:2005. *Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Laboratoriniai grunto bandymai. 11 dalis. Pralaidumo vandeniui nustatymas esant pastoviam ir kintančiam spūdžiui (ISO/TS 17892-11:2004)*

Madansky, A. 1988. *Prescription for Working Statisticians*. New York: Springer-Verlag

Maskeliūnaitė, L.; Sivilevičius, H. 2014. The model for evaluating the criteria describing the quality of the trip by international train, *Technological and Economic Development of Economy* 20(3): 484–506. doi:10.3846/20294913.2014.949333

Meyer, M. D. 2008. Design Standards for U. S. Transportation Infrastructure: The Implications of Climate Change

Mickievič, A.; Rimkus E. 2013. Vidutinės oro temperatūros dinamika Lietuvoje. *Geografija* 49(2): 114–122

Miller, R. G., Jr. 1986. *Beyond ANOVA, Basics of Applied Statistics*. New York: John Wiley & Sons. 317 p.

Mishra, D.; Qian, Y.; Kazmee, H.; Tutumluer, E. 2014. Investigation of geogrid-reinforced railroad ballast behavior using large-scale triaxial testing and discrete element modeling. *Transportation Research Record* 2462: 98–108. doi:10.3141/2462-12

Moaveni, M.; Wang, S.; Hart, J. M.; Tutumluer, E.; Ahuja, N. 2013. Evaluation of Aggregate Size and Shape by Means of Segmentation Techniques and Aggregate Image Processing Algorithms, *Transportation Research Record* 2335: 50–59. doi:10.3141/2335-06

Monnet, J.; Boutonnier, L. 2012. Calibration of an unsaturated air-water-soil model, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 12(4):493–499. doi:10.1016/j.acme.2012.07.001

Montgomery, D. C.; Runger, G. C. 1999. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Second edition. New York: John Wiley & Sons, Inc. 817 p.

Motiejūnas, A.; Paliukaitė, M.; Vaitkus, A.; Čygas, D.; Laurinavičius, A. 2010. Research of Dependence of Asphalt Pavement Stiffness upon the Temperature of Pavement Layers, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 5(1): 50–54. doi:10.3846/bjrbe.2010.07

Morice, C. P.; Kennedy, J. J.; Rayner, N. A.; Jones, P. D. 2012. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates:

The HadCRUT4 data set, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 117 (D8). doi:10.1029/2011JD017187

Mučinis, D.; Sivilevičius, H.; Oginskas, R. 2009. Factors determining the inhomogeneity of reclaimed asphalt pavement and estimation of its components content variation parameters, *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 4(2): 69–79. doi:10.3846/1822-427X.2009.4.69-79

Nguyen, K. 2013. *Efectos dinámicos debidos al tráfico de ferrocarril sobre la infraestructura de la vía y las estructuras*: Doctoral dissertation thesis. Technical university of Madrid. Spain. 229 p.

Nguyen, K.; Goicolea, J. M.; Galbadon, F. 2011. Dynamic effect of high speed railway traffic load on the ballast track settlement, *Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia*, Coimbra, Portugal, 1–19

Nguyen, K.; Goicilea, J.M.; Galbadon, F. 2014. Comparson of dynamic effects of high-speed traffic load on ballasted track using a simplified two dimensional and full three-dimensional model, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 228(2): 128–142. doi:10.117/0954409712465710

Nicks, J. E. 2009. *The Bump at the End of the Railway Bridge*: Doctoral dissertation thesis, Texas A&M University, USA. 575 p.

Nimbalkar, S.; Indraratna, B.; Dash, S.K.; Christie, D. 2012. Improved performance of railway ballast under impact loads using shock mats, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 138(3): 281–294. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000598

Nobili, A. 2013. Superposition principle for the tensionless contact of a beam resting on a Winkler or a Pasternak foundation, *Journal of Engineering Mechanics* 139(10): 1470–1478. doi:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000555

Noguchi, T.; Fujii, T. 2000. Minimizing the Effect of Natural Disasters, *Japan Railway & Transport Review* 23: 52–59

O'Brien, J.; Rizos, D. C. 2005. A 3D BEM-FEM methodology for simulation of high speed train induced vibrations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25(4): 289–301

Peel, M. C.; Finlayson, B. L.; McMahon T. A. 2007. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification, *Hydrology Earth Systems Sciences* 11: 1633–1644. doi:10.5194/hess-11-1633-2007.

PLANCO, BFG. 2007. Economical and Ecological Comparison of Transport Modes: Road, Railways, Inland Waterways, *Summary of Findings*. 43p. [žiūrėta 2016 balandžio 5 d.]. Prieiga per internetą: http://www.ebu-uenf.org/fileupload/SummaryStudy_engl.pdf

Podvezko, V.; Sivilevičius, H. 2013. The use of AHP and rank correlation methods for determining the significance of the interaction between the elements of a transport system having a strong influence on traffic safety, *Transport* 28(4): 389–403. doi:10.3846/16484142.2013.866980

Prazdnikova, G. I. 1982. Investigation of contact zone of adfreezing of soil with foundation surface, *SRI Bases of Transport*, Moscow 77:138–143

Predpis ŽSR TS 3: 2012 *Železničný zvršok*, ŽSR. 256p.

Puzavac, L.; Popovic, Z.; Lazarevic, L. 2012. Influence of track stiffness on track behavior under vertical load, *PROMET* 24(5): 405–412

Railway Technical Research Institute. 2004. *Clarification of Phenomenon of Ballast Thrown up by Snow/Ice Falling from the Train*, Tokyo Japan, 62 p.

Railway Technical Standard 73 6312 Proposed Construction Design of the Subgrade Layers (in Slovak). Directorate General of the Railways of the Slovak Republic, August 2005

Raymond, G.P.; Bathurst, R.J. 1987. Performance of large-scale modelsingle tie-ballast systems, *Transport Research Record* 1131: 7–14

Razali, N.M.; Wah, Y. B. 2011. Power comparisons of Shapiros-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests, *Journal of Statistical Modeling and Analytics* 2(1):21–33

Real, J. I.; Gomez, L.; Montalban, L.; Real, T. 2012. Study of the influence of geometrical and mechanical parameters on ballasted railway design, *Journal of Mechanical Science and Technology* 26(9): 2837–2844. doi:10.1007/s12206-012-0734-7

Ril 836: Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instandhalten, Fassung vom 20.12.1999a, 2. Aktualisierung gültig ab 01.02.2013, DB Netz AG

Rossetti, M.A. 2007. Analysis of the weather events on U.S. railroads, 23rd Conference on IIPS, https://ams.confex.com/ams/87ANNUAL/techprogram/paper_118791.htm

Ružinskas, A.; Bulevičius, M.; Sivilevičius, H. 2016. Laboratory investigation and efficiency of deicing materials used in road maintenance, *Transport* (31)2:147–155. doi:10.3846/16484142.2016.1190787

Sadeghi, M. J.; Youldashkhan, M. 2005. Investigation on the accuracy of the current practices in analysis of railway track concrete sleepers, *International Journal of Civil Engineering* 3(1): 31–45

Sadeghi, J.; Liravi, H.; Esmaeili, H. 2017. Experimental investigation on loading pattern of railway concrete slabs, *Construction and Building Materials* 153(30): 481–495. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.025

Sadovsky, A. V. 1967. Determination of adfreezing strength of soil with concrete by method of plane shear, *Nord Department of SRI Bases*, Syktyvkar 3: 70–79

Salour, F.; Erlingsson, S. 2015, Resilient modulus modeling of unsaturated subgrade soils: laboratory investigation of silty sand subgrade, *Road Materials and Pavement Design* 16(3): 553–568. doi: 10.1080/14680629.2015.1021107

- Sanudo, R.; dell'Olio, L.; Casado, J. A.; Carrascal, I. A.; Diego, S. 2016. Track transitions in railways: A review, *Construction and Building Materials* 112: 140–157. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.084
- Sato, Y. 1995. Japanese studies on deterioration of ballasted track, *Vehicle System Dynamics* 24(1):197–208
- Selig, E. T.; Waters, J. M. 1994. *Track Geotechnology and Substructure Management*. Thomas Telford Services Ltd., London. 446 p.
- Shahu, J. T.; Kameswara Rao N. S. V.; Yudhbir. 1999. Parametric study of resilient response of tracks with a sub-ballast layer, *Canadian Geotechnical Journal* 36(6): 1137–1150. doi: 10.1139/t99-054
- Shapiro, S. S.; Wilk, M. B. 1965. An analysis of variance test for normality (Complete Samples), *Biometrika* 52(3/4): 591–611
- Shao, S. S.; Ranjith, P. G.; Chen, B.K. 2013. Influence of high temperature on the mechanical behaviour of Australian Strathbogie granites with different grain sizes, *47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*, CA, USA, 23–26
- Shenton, M. J. 1984. Ballast deformation and track deterioration, *Proceedings of a Conference on Track Technology*, University of Nottingham: 253–265
- Sherif, Y. S.; Smith, M. L. 1981. Optimal maintenance models for systems subject to failure: a review, *Journal Naval Research Logistics Quarterly* 28: 47–74
- Shoaei, D. M.; Alkarni, A.; Noorzaei, J.; Jaafar, M. S.; Huat, B. K. 2012. Review of available approaches for ultimate bearing capacity of two-layered soils, *Journal of Civil Engineering and Management* 18(4): 469–482. doi:10.3846/13923730.2012.699930
- Shusherina, E. P.; Jarov, A. A.; Zabolotskaya, M. I.; Perelmiter, A. D.; Momotova, T. S. 1982. Adfreezing strenght of sandy soils and clayey soils under alientation, *Rheology of soils and engineering permafrost*, Moscow 81–93
- Subačius, R. 2006. Geležinkelių žemės sankasų projektavimo nurodymai (SN 449-72). Vilnius: Lietuvos geležinkeliai. 80 p.
- Sun, Y.F.; Xiao, Y.; Ju, W. 2014. Bounding surface model for ballast with additional attention on the evolution of particle size distribution, *Science China Technological Science* 57(7): 1352–1360. doi:10.1007/s11431-014-5575-4
- Sivilevičius, H. 2003. Influence of homogeneity of mineral materials' grading and dosing errors on the stability of asphalt concrete mixture composition, *Journal of Civil Engineering and Management* (9)1: 25–35. doi:10.1080/13923730.2003.10531298
- Sivilevičius, H.; Maskeliūnaitė, L. 2014. The numerical example for the evaluating the criteria describing the quality of the trip by international train, *E&M Economie a Management* 17(2):73–86. doi:10.15240/tul/001/2014-2-006

- Sivilevičius, H.; Podvezko, V.; Vakrinienė, S. 2011. The use of constrained and unconstrained optimization models in gradation design of hot mix asphalt mixture, *Construction and building materials* 25(1): 115–122. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.050
- Sivilevičius, H.; Vansauskas, V. 2013. Research and evaluation of ruts in the asphalt pavement on Lithuanian highways, *Journal of Civil Engineering and Management* 19(5): 609–621. doi:10.3846/13923730.2013.817481
- Skoglund, K. A. 2002. *A Study of Some Factors in Mechanistic Railway Track Design*: Doctoral dissertation thesis. Norwegian University of Science and Technology, Norway, 260 p.
- Snedecor, W. G.; Cochran, G. W. 1989. *Statistical methods*. USA. Ames, Iowa: Iowa State University Press. 506 p.
- Stahl, M.; Konietzky, H. 2011. Discrete element simulation of ballast and gravel under special consideration of grain-shape, grain-size and relative density, *Granular Matter* 13: 417–428. doi:10.1007/s10035-010-0239-y
- Steffens, D. M. 2005. *Identification and Development of a Model of Railway Track Dynamic Behaviour*: Doctoral dissertation thesis. Queensland University of Technology, Brisbane, Australia, 220 p.
- STR.2.05.01:2013 *Pastatų energinio naudingumo projektavimas*
- Sol-Sánchez, M.; Thom, N. H.; Moreno-Navarro, F.; Rubio-Gámez, M.C.; Airey, G. D. 2015. A study into the use of crumb rubber in railway ballast, *Construction and Building Materials* 75: 19–24. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.10.045
- Somov, D.; Bazaras, Ž. 2011. The restoration of physical and mechanical properties of wheel rim metal, *Transport* 26(3): 240–247. doi: 10.3846/16484142.2011.622132
- SV-HEAT - 2D/3D Geothermal Modeling*, SVOFFICE 2009 – Geotechnical Modeling Suite. SoilVision systems Ltd., Saskatoon, Saskatchewan. [žiūrėta 2014 balandžio 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.soilvision.com>.
- Szurgott, P.; Bernys, K. 2013. Numerical analysis of load distribution in railway track under wheelset, *Journal of KONES Powertrain and Transport* 20(3): 405–410
- Šiaudinis, G. 2006. Relationship of Road Pavement Deformation Moduli, Determined by Different Methods, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 1(2): 77–81.
- Šiaudinis, G.; Čygas, D. 2007. Determination of Seasonal Effects on the Structural Strength of Asphalt Pavements, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 2(2): 67–72.
- Štreimikienė, D.; Šliogerienė, J. 2011. Comparative assessment of future motor vehicles under various climate change mitigation scenarios, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(8): 3833–3838. doi:10.1016/j.rser.2011.07.020

Teixeira, P. F.; Ferreira, P. A.; López Pita, A.; Casas, C.; Bachiller, A. 2009. The Use of Bituminous Subballast on Future High-Speed Lines in Spain: Structural Design and Economical Impact, *International Journal of Railway* (2)1: 1–7. doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.888

Teixeira, P. F.; Lopez Pita, A.; Ferreira, P.A. 2010. New possibilities to reduce track costs on highspeed lines using a bituminous sub-ballast layer, *International Journal of Pavement Engineering* 11(4): 301–307. doi:10.1080/10298431003749733

Thom, N. 2007. Factors affecting track bed maintenance requirements: a theoretical study, *Proceedings of a Conference on Railway Engineering*, London

Tietäväinen, H.; Tuomenvirta, H.; Venäläinen, A. 2010. Annual and seasonal mean temperature in Finland during the last 160 years based on gridded temperature data, *International Journal of Climatology* 30: 2247–2256

TNŽ 72 1514: 2000. *Technické a ekologické podmienky na dodávanie materiálu do konštrukcie koľajového lôžka a podkladných vrstiev podvalového podložia*

TNŽ 73 6312: 2005 *Navrhovanie konštrukčných vrstiev podvalového podložia*

Tsytoich, N. A. 1973, *Mekhanika morzlykh gruntov* (Mechanics of Frozen Soils), Moscow, 448 p.

Tumavičė, A.; Laurinavičius, A.; Vaitkus, A.; Mikaliūnas, Š.; Perveneckas, Z.; Čiuprinskas, K. 2017. Effectiveness analysis of railway noise mitigation measures, *Gradevinar* 69(1):41–51. <https://doi.org/10.14256/JCE.1877.2016>

US Army Corps of Engineers. 2000. Technical Instructions, Railroad Design and Rehabilitation, TI 850-02, AFMAN 32-1125(I) 175 p.

Ustrnul, Z.; Wypych, A.; Kosowski, M. 2012. Extreme temperatures and precipitation in Poland – an evaluation attempt, *Meteorologische Zeitschrift* 21(1): 37–47. doi:10.1127/0941-2948/2012/0336

Vaitkus, A.; Gražulytė, J.; Skrodenis, E.; Kravcovas, I. 2016. Design of Frost Resistant Pavement Structure Based on Road Weather Stations (RWSs) Data, *Sustainability* 8(12): 1–13. doi:10.3390/su8121328

Vale, C.; Ribeiro, I. M.; Calçada, R. 2012. Integer programming to optimize tamping in railway tracks as preventive maintenance, *Journal of Transportation Engineering* 138(1): 123–131. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000296

Van, M. A. 1996. Buckling analysis of continuous welded rail track, *HERON*, 41(3): 175–186. [žiūrėta 2014 vasario 3 d.]. Prieiga per internetą: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:2851a45d-0535-49bd-97b4-6db504df0607?collection=research>

VEGA 1/0756/12 Experimental monitoring and mathematical modeling of thermal regime of railway subgrade structure. (in:) Scientific Research. FCE-DRETM, Faculty of Civil Engineering, University of Žilina, <http://svf.uniza.sk/kzsth>. Ministry of Education, Science, Research – VEGA MŠ SR, <http://www.minedu.sk>, SK, 2012–2015

- Votyakov, I. N. 1958. Laboratory investigation of adfreezing forces of soil with concrete, *NOD Institute Permafrost of Transport*, Yakutsk 1: 29–34
- Vorobiov, M. S. 1973 Factors, forming a resistance of soil to shear along of lateral surface of infreezed pile, *PSRIIC Transportation*, Moscow 24: 24–31
- Zakeri, A. J.; Mosayebi, A. S. 2016. Study of ballast layer stiffness in railway tracks, *Gradevinar* 68(4):311–318. doi: 10.14256/JCE.1232.2015
- Zakeri, A. J.; Mozaybi, A. S.; Esmaeili. 2016. Numerical and field investigations of track dynamic behavior caused by light and heavy railway vehicles, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 54(3): 871–879, doi:10.15632/jtam-pl.54.3.871
- Zhai, W.M.; Wang, K.Y.; Lin, J.H. 2004. Modelling and experiment of railway ballast vibrations, *Journal of Sound and Vibration* 270(4-5): 673–683. doi:10.1016/S0022-460X(03)00186-X
- Zhou, T.; Hu, B.; Sun, J.; Liu, Z. 2013. Discrete element method simulation of railway ballast compactness during tamping process, *The Open Electrical and Electronic Engineering Journal* 7:103–109. doi:10.2174/187412900137010103
- Woods, R. D. 1968. Screening of Surface Waves in Soils. The University of Michigan Industry Program of the College Engineering. 63p. [žiūrėta 2017 spalio 7 d.]. Prieiga per internetą: <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/8349/bad6526.0001.001.pdf?sequence=5>
- Wooler, S. 2003. The changing climate: its impact on the Department for Transport. London, United Kingdom, Department for Transport
- Wu, Q. B.; Dong, X. F.; Liu, Y. Z.; Jin, H. J. 2007. Responses of permafrost on the Qinghai – Tibet Plateau, China, to climate change and engineering construction, *Arctic and Ant-arctic Alpine Research* 39: 682–687
- Xiao, Y.; Liu, H.L.; Yang, G.; Chen, Y.M.; Jiang, J.S. 2014. A constitutive model for the state-dependent behaviors of rockfill material considering particle breakage, *Science China Technological Sciences* 57: 1636–1646. doi:10.1007/s11431-014-5601-6
- Xu, P.; Sun, Q.; Liu, R.; Wang, F. 2011. A short-range prediction model for track quality index, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 225(3): 277–285. doi:10.1177/2041301710392477

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo leidiniuose

Navikas, D.; Bulevičius, M.; Sivilevičius, H. 2016. Determination and evaluation of railway aggregate sub-ballast gradation and other properties variation, *Journal of civil engineering and management* 22(5): 699–710. doi:10.3846/13923730.2016.1177586 (Claritative Analatycs Web of Science; IF: 1,546)

Navikas, D.; Sivilevičius, H. 2015. Geležinkelio pobalastinio sluoksnio iš užpildų mišinio savybių tyrimas Eng. Mixtures properties of railway sub-ballast layer research. *Mokslas – Lietuvos ateitis: Statyba, transportas, aviacinės technologijos = Science – Future of Lithuania: Civil and transport engineering, aviation technologies* 7(5): 540–545. doi:10.3846/mla.2015.818 (IndexCopernicus)

Navikas, D. Sivilevičius, H. 2017^b. Aplinkos oro neigiamos temperatūros įtakos geležinkelio konstrukcijos peršalimo gyliui Lietuvoje modeliavimas, *Mokslas – Lietuvos ateitis: Statyba, transportas, aviacinės technologijos = Science – Future of Lithuania: Civil and transport engineering, aviation technologies* 9(5): 547–552. doi:10.3846/mla.2017.1076 (IndexCopernicus)

Straipsniai kituose leidiniuose

Navikas, D, Sivilevičius, H. 2017^a. Modelling of snow cover thickness influence on the railway construction temperature regime under variable weather conditions, *Procedia Engineering. TRANSBALTICA 2017. Transportation science and technology: proceedings of the 10th international scientific conference* 187: 124–134.
doi:10.1016/j.proeng.2017.04.358 (ISI Proceedings)

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

Compared with other countries, the Lithuanian railway network is not widely developed. In order for it to operate smoothly and make joint railway network with the European and the neighbouring countries, the existing railway tracks needs to be preserved, maintained and improved. The network of the newly built railway tracks, which is known for higher speed limits and acceptable loads, must be as durable as possible. Main properties of new railway track construction are rolling stock even loads distribution on the railway track construction, the strength and the durability of the railway track construction under the influence of ambient air factors.

The experience in the operation and maintenance of railway tracks shows that these structures function shorter than they could, while the experience of the design and operation of railway tracks in other countries shows that train speeds and durability and strength of road structures could be higher. With changing seasons, rising railway structure pollution and increasing track load, the functionality of the railway track construction ballast and sub-ballast layers deteriorates, which reduces the rolling stock speed, track capacity, traffic safety and requires more frequent maintenance of tracks.

In order to increase the period of operation of railway tracks, the lifespan of rolling stock and to improve traffic safety, the existing “car-track” models must be improved, also revising railway track construction and rolling stock interoperability processes,

addressing tasks of compatibility of these elements, controlling and forecasting their condition during operation.

Having included in numerical models physical and mechanical properties of materials used to install railway track construction and data of the measured actual temperature and moisture changing in railway track construction layers as well as the changing ambient air temperature and snow thickness, assessing the progress of physical processes occurring in the railway track construction more accurately becomes possible. The inclusion of the quantities of water and air contained in railway track construction layers and materials used to install the layers as well as the temperature indicator in numerical models of the “car–track” system allows calculating dependences of displacement and stiffness coefficients on ambient air temperature, which allow for a more reliable assessment of railway track construction performance properties.

Relevance of the thesis

The durability of railway tracks is a pursued result, which forms the basis for the safety of passengers and freight, expenses for the repair works of railway tracks and the economic benefit received from carriage. The factors reducing the durability of railway tracks are as follows: increasing traffic intensity of freight and passenger trains; increasing permissible axle load; excessive speeds on curves and gradients; environmental factors (temperature, water and pollutants).

The factors of production, transportation, storage, building and control do not sufficiently ensure the homogeneity of the properties of materials for ballast and sub-ballast layers. This thesis analyses physical and mechanical properties of used materials in ballast and sub-ballast layers as well as separate railway track construction layers and their changes under the influence of load created by rolling stock and ambient air factors.

The quality of the existing tracks is checked by measuring size of the deviations in the width of the gauge and other six parameters which allows deciding on the condition of the entire track structure. In order to optimize the use of funds, using new design methods and choosing rational conditions for material production, transportation and construction of railway tracks is expedient. The use of appropriate structural materials in railway track construction, which ensure the best possible performance of railway tracks during the period of their operation under prevailing variable traffic loads and ambient air factors, determine the durability of railway track construction.

In Lithuania, ambient air, the amount of moisture in the layers, frost depth, which depends on trends of climate warming, and snow thickness have been included into the methodology of railway track construction, so far. In addition, the data of elastic modulus of the layers is not included as well. Complex assessment of rolling stock loads and the above mentioned factors would allow selecting thickness of layers and type of mineral materials more accurately.

The object of research

The object of the research is ballast and sub-ballast layers of railway track, which are affected of the train traffic loads and ambient air factors.

The aim of the thesis

The aim of the thesis is to present the numerical modelling methods and experimental data based methodology for prediction of the behavior of railway track construction, which allows to increase its durability when the train traffic loads and ambient air factors affects.

The tasks of the thesis

The following objectives were set to achieve the aim of the thesis:

1. To analyse factors, having a destructive effect on railway track construction and determining the durability of railway track construction.
2. To analyse the methods and numerical models created by other researchers to investigate the impact of the load created by the rolling stock on railway track construction.
3. To analyse different materials used to install railway track construction and their properties, and to determine the physical and mechanical properties of the mineral materials used for the formation of ballast and sub-ballast and their impact on operational properties of railway track construction.
4. Having carried out field experiments, to create virtual models of different railway track construction cross profiles used and to be used in normative design documentation of the Republic of Lithuania, which allow determining the impact of ambient air temperature, the thickness of snow cover and moisture on the depth of frost of different railway track construction layers.
5. Having carried out experimental tests and numerical modelling, to determine deformations and displacements of different railway track construction in Lithuania with changing AOT and at the maximum axle load.
6. To compare the received results of the maximum vertical stiffness coefficients of GKK with research results of other authors and to create a methodology for assessing the impact of AOT and rolling stock loads on GKK.

The research methodology

Methods of mathematical statistics, mathematical analysis, regression analysis, numerical modelling for research and evaluation of quality indicators of materials used to install railway track construction layers, also methods for measuring AOT, thickness of snow cover, precipitation, moisture and temperature in GKK layers are used in the thesis.

Scientific novelty of the thesis

The following results, which are new in the transport engineering field, were received while preparing the doctoral dissertation:

1. Comprehensive application of the method of mathematical statistics and analysis provides a more detailed assessment of the quality indicators of mineral materials used in railway track construction during the technological process: from production to the places of their use.
2. Virtual models of cross profiles of railway track construction were created in the “SV HEAT” software package environment, allowing assessing physical processes of these structures under changing ambient air conditions.

3. A more versatile methodology was developed assessing the ambient air factors and revising the design of different railway track construction in presence of inaccurate maps on soil frost depths or in their absence altogether.
4. Dependence of railway track construction stiffness coefficients on ambient air was determined, revising complex models of railway track construction design and the change of thickness of layers during operation.

Practical value of the research findings

1. The change in physical and mechanical properties of materials used in ballast and sub-ballast was determined in different stages of technological. The maximum standard deviation of complete pour-out through sieves obtained from regression equation was used to assess the distribution of gradation. This method allows assessing the scope of variation of gradation of any loose mixture in a single figure (the maximum standard deviation).
2. Virtual models of different railway track construction cross profiles used and to be used in normative design documentation of the Republic of Lithuania were compiled for forecasting railway track construction performance indicators. These models allow choosing rational structures and their materials knowing the quality indicators of materials used in railway track construction layers and ambient air factors, thus increasing durability of railway track construction.
3. Practical application of the created methodology and virtual models of different railway track construction cross profiles used and to be used in normative design documentation of the Republic of Lithuania is possible assessing the impact of the levels of cold highest in the past fifty winters, temperatures below zero and snow cover thickness on the frost depth.
4. Having increased railway track construction durability and the actual inter-repair periods, the rational use of funds of the budget of the Republic of Lithuania for works of construction and repair of railway tracks would be ensured.
5. Received results can be used for improving methodologies of forecasting design and performance indicators by assessing the loads, created by rolling stock, and ambient air factors.

Defended statements

1. Mineral materials used to install ballast and sub-ballast layers and their mixtures in the course of different technological process stages are not homogenous. Having assessed the distribution of their properties, the occurring segregation can be controlled in the production and transportation process.
2. The created virtual models of cross profiles of railway track construction allow reliably assessing soil frost processes under changing ambient air factors.
3. The thicker snow cover covering non-perpendicular railway track construction, is at the beginning of winter the lower frost depth occurs later.
4. Railway track construction with thicker PBS (KG1) reduces vertical displacements of the load created by rolling stock and the railway track construction frost depth.

5. The greatest maximum displacements in railway track construction as a result of rolling stock load occur at temperatures of 0°C, where railway track construction stiffness coefficient is the lowest.

Approval of the research findings

4 scientific publications were published on the topic of the dissertation: one – in the scientific journal included in the *Thomson Reuters Web of Science* database having an impact factor (IF) (Navikas *et al.* 2016); one – in the international conference publication referenced in the *Thomson Reuters* database *Proceedings* (Navikas, Sivilevičius 2017^a;) and two – in scientific journals referenced in publications of other international databases (Navikas, Sivilevičius 2015; Navikas, Sivilevičius 2017^b).

Results of the research carried out in the dissertation were presented in two scientific conferences in Lithuania:

1. the international scientific – practical conference: “Technological innovations to meet the needs of sustainable society – 2015” held in 2015 in Vilnius (Lithuania);
2. the 10th international conference “Transbaltika 2017” held in 2017 in Vilnius (Lithuania).

The structure of the dissertation

Dissertation consist of an introduction, three chapters, general conclusions and 7 annexes.

The scope of a dissertation is 141 text pages excluding annexes, 23 numbered formulas, 67 figures and 17 tables were used, 223 literature sources were referenced when preparing a dissertation.

Acknowledgement

I would like to express my very sincere appreciation to my scientific supervisor Prof. Habil. Dr Henrikas Sivilevičius for the patience, valuable suggestions and assistance preparing the dissertation. I would also like to thank Prof. Habil. Dr Marijonas Bogdevičius for the valuable suggestions preparing mathematic model, Prof. Dr. Libor Ižvolt and staff of Railway Engineering and Track Management Department for the warm welcome and possibility to do researches in Žilina University, Dr Matas Bulevičius and company PLC “Problematika” for collaborative researches.

My grateful thanks are also extended to my colleagues from the Mobile Machinery and Railway Transport Department of Vilnius Gediminas Technical University and Automobiles Transport Engineering Department of Vilnius College of Technologies and Design and management staff of Vilnius College of Technologies and Design for their help and support, also to my family and friends for their support, patience and understanding during my PhD studies.

1. Analysis of worldwide experience of railway track constructions layers researches

Vertical mechanics of railway tracks is a complex process, because there are many determinant factors: interaction between wheelsets and the track, interaction between

railway track construction layers, impact of environmental factors and the effects of infrastructure on the structure. The main purpose is to reduce vertical displacements, thus reducing railway track construction deformations and extending its lifespan. Many models were developed to solve the problem of reduction of vertical displacements (Dahlberg, 2001; Dahlberg, 2003; Burrow, 2007).

Sub-ballast – protective embankment layer under the top railway track construction part ballast layer is an integral part of embankment for installing a stable upper structure to be operated for a long time. This layer (Fig. S.1.1.) is installed using KG1 or KG2 mixtures for protecting the embankment from the impact of high pressure of moving load on the upper structure, frost-susceptible soils - from frost effects and soils sensitive to water - from precipitation and capillary water (Apsauginio... 2013)

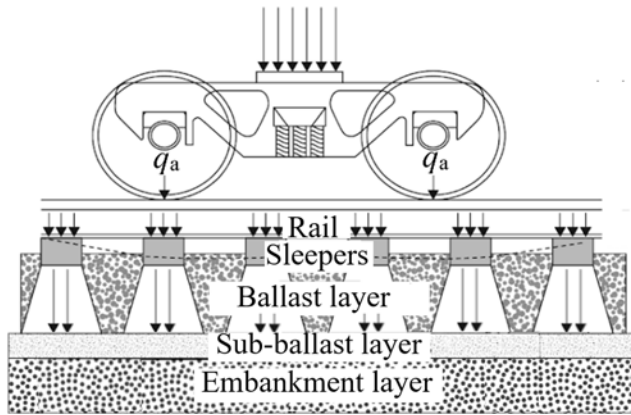


Fig. S.1.1. Wheelset loads affecting railway track structure (Indraratna *et al.* 2011)

Solid state (ice lenses) of moisture contained in railway track construction layers, starts to form in the areas where temperatures fall below 0°C . Depending on the duration of negative temperatures, values of the frost depth may vary significantly (Fig. S.1.2.). Theoretical analysis of the frost depth of GKK revealed that the negative temperature degree and its impact duration have the greatest effect of all the ambient air factors.

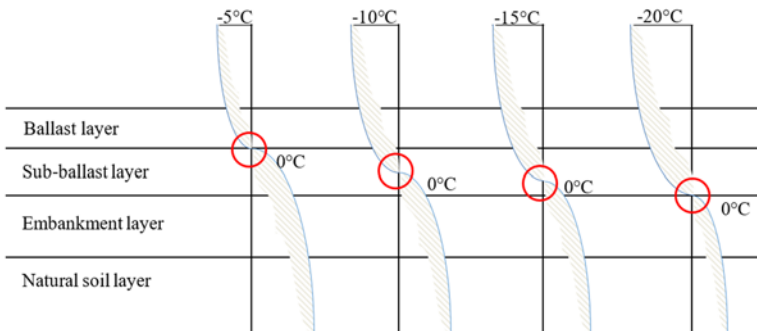


Fig. S.1.2. Theoretical temperature distribution in railway track construction during 5 days period

Disregarding the thickness of railway track construction layers at the temperatures below minus 10°C, the frost depth should not reach the top of the structural layer of the embankment. The thickness of the snow cover at negative ambient should reduce frost depth. Moisture content of materials used in railway track construction may vary significantly, thus frost depth may differ as well. In addition to the change of temperatures, the thickness of snow cover and/or precipitation are other factors determining the frost depth of structural layers.

2. Determination of ballast and sub-ballast layers properties and modelling of hydrothermal and vertical deformations

The analysis of the effects of destructive factors on the durability of railway track construction revealed that quality properties of railway track construction materials used to install (ballast and sub-ballast) layers are among causative ones. The properties of these materials and the installation technologies determine the functionality of individual railway track construction layers and the resistance to destructive factors (Fig. S.2.1.).

The dispersed maximum force concentration (Fig. S.2.2.) monitored at the point of coupling of two railcars under the influence of force of 4 or more wheelsets was chosen to optimize calculations (because normally, the simulation of one situation would take up many computer and time resources). One of the heaviest rolling stocks present in Lithuania at the time ($q_a = 225$ kN) was chosen as the largest load of the wheelset. In order to receive more accurate results, the force affecting railway track construction was dispersed (Fig. S.2.3.) according to the applied methodologies (Awoloye *et al.* 1993; Klotzinger, 2008b; Selig and Waters 1994).

Ambient air temperature from minus 30 °C to plus 30 °C was simulated to receive modelling results. 0.8 s was chosen as the load exposure time, which corresponds to the minimum rolling stock speed (of 25 km/h), i. e. the maximum effective time of the load on GKK created by rolling stock. The load exposure time was selected taking into account the Sadegh, Youldashkhan, 2005 research discussed in the first chapter.

The field experiment stand present in the University of Žilina, which has similar geometrical parameters and the layer thickness and materials thereof are the same as those in the numerical model, used to determine the composition of the layers. Ballast layer was formed of granite rubble 0/63 mm, sub-ballast – of mineral material mixture 0/32 mm KG1, embankment layer – of 0/63 mm sand and gravel mixture and the natural soil layer – of sandy clay and sandy loam. The use of this experimental stand allowed determining percentage compositions of components of separate railway track construction structural layers (Table S.2.1).

Standard and normative design documents present elasticity moduli of homogenous materials. Theoretical dependences of elasticity moduli (E) of separate railway track construction layers on temperature (t) (Fig. S.2.4.) were formulated based on the received railway track construction layers compositions (Table S.2.1.) and the results of studies of the dependences of modules of elasticity of materials used to install railway track construction layers on temperature carried out by other researchers so far.

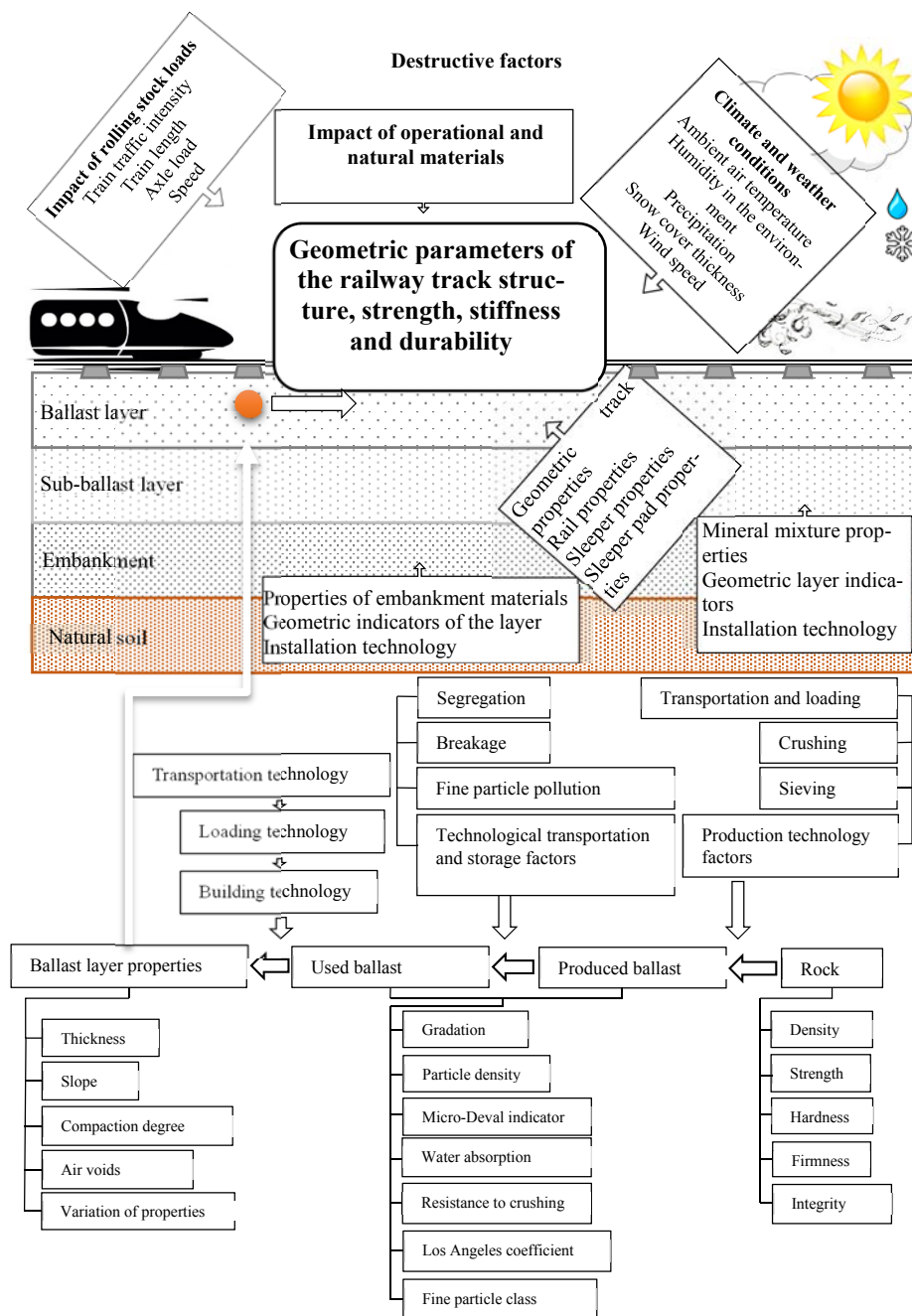


Fig. S.2.1. Destructive factors affecting railway track construction

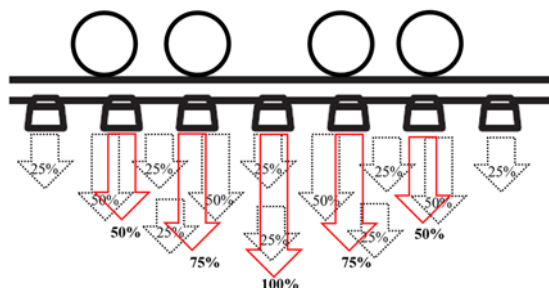


Fig. S.2.2. Axle load distribution to railway track construction model

The received theoretical dependences of elasticity moduli of separate railway track construction layers on temperature (Fig. S.2.4. c, d, e, f) show that the values of elasticity moduli decrease (E_{stand} – elasticity modulus of structural material, E_{modif} – elasticity modulus of the layer). Dependence of the water elasticity modulus (E_L) was received looking for the regression equation in the results of research carried out by Berdenikov 1955; Bragov et al. 2015; Gold 1958, 1994; Gold, Traetteberg 1975; Gold et al. 1992, which would show a continuous dependence (Fig. S.2.4. a). Dependences of elasticity moduli of water (E_L) (Fig. S.2.4. a) and air (E_O) (Fig. S.2.4. b) mixture were formulated in the same manner according to their percentage share in the mixture.

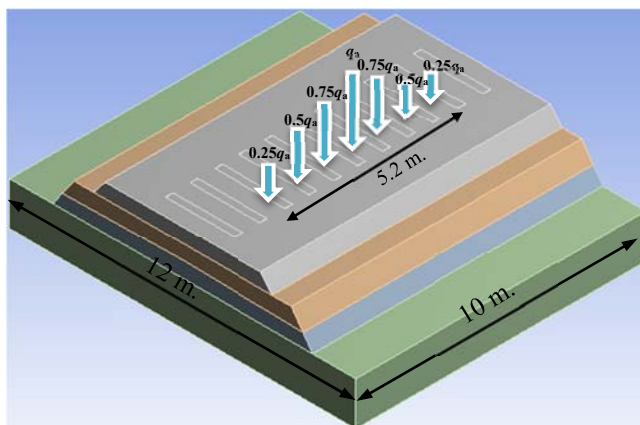


Fig. S.2.3. Railway track construction model in ANSYS program

Dependences of the elasticity moduli of loose materials used to install railway track construction presented in (Fig. S.2.4. c, d, e, f) and of structural layers reveal that the respective water and air content in structural layers reduces elasticity moduli. The use of granite rubble to install ballast layer reduces the elasticity modulus by about 3 GPa. Sub-ballast elasticity modulus decreases by about 2 GPa when using mineral aggregate mixture that meets KG1 normative specifications.

Elasticity moduli of the embankment layer formed of sand/ gravel mixture and natural soil layer consisting of sandy loam and sandy clay at 0 °C or similar temperatures are known for elasticity modulus values similar to those of materials used in their installation.

With temperatures changing from minus 5 °C to 10 °C and plus 5 °C to 10 °C, differences between elasticity moduli of the embankment and natural soil layers increase compared to the materials used to install them.

Table S.2.1. Composition of railway track construction layers in percentages

Layer	Layer composition, %		
	Air	Water	Construction material
Ballast layer	6.6	1.4	92.0
Sub-ballast layer	2.0	3.9	94.1
Embankment layer	1.5	17.5	81.0
Natural soil layer	1.0	15.7	83.3

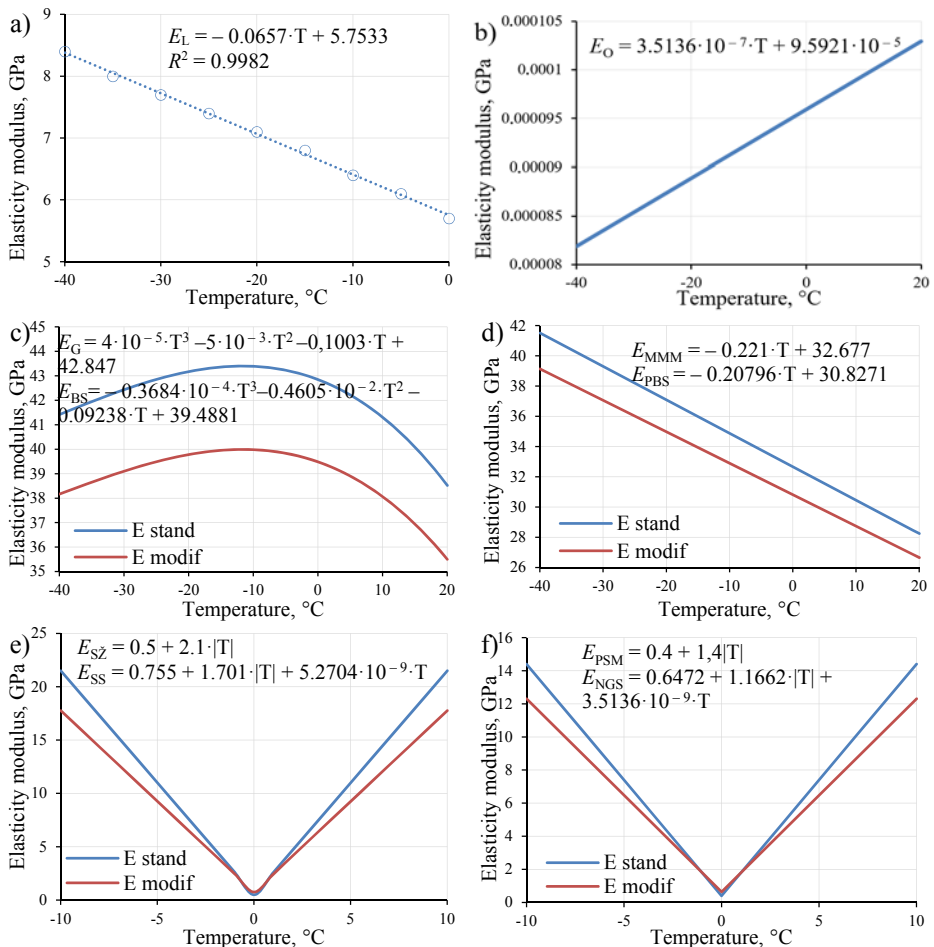


Fig. S.2.4. Elasticity modulus of different materials: a) ice/ water; b) air; c) granite/ ballast layer; d) mineral materials (KG1)/ sub-ballast layer; e) sand and gravel mixture/subgrade layer; f) sandy loam and sandy clay/ natural ground layer

The greatest difference between elasticity moduli is reached at the temperature of plus/minus 10 °C, with the elasticity modulus of the embankment layer being 5 GPa and of natural soil layer – 3 GPa.

3. Experimental research of railway track construction materials and layers

Sub-ballast thickness has a positive impact on railway track construction frost depth under negative ambient air temperature; railway track construction with different sub-ballast thickness (0.4 m, 0.5 m and 0.6 m) and maximum vertical railway track construction displacements under loads created by rolling stocks were determined. Having used railway track construction model in ANSYS programme (S.2.3.), the maximum vertical displacements of cross profile railway track construction were received (S.3.1.) at different sub-ballast thicknesses (0.4 m, 0.5 m and 0.6 m).

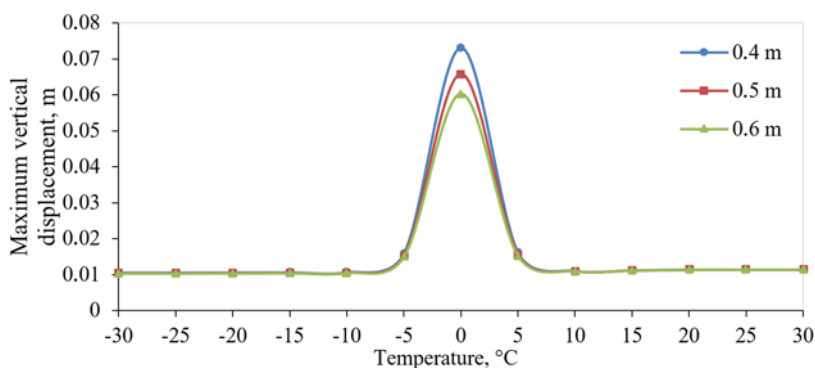


Fig. S.3.1. Maximum vertical displacements of of the whole railway track construction when different thicknesses of sub-ballast were used

Dependences illustrated in Fig. S.3.1. show that the maximum vertical displacements in all railway track construction were received at the layer temperature of 0 °C. When simulating railway track construction with 0.4 m-thick PBS at 0 °C, the received maximum vertical displacement of the entire railway track construction was 0.0732 m, with 0.5 m-thick sub-ballast it was 0.0658 m and 0.6 m-thick sub-ballast – 0.0603 m railway track construction can be concluded to be most vertically deformative in the spring, autumn and winter seasons, when ambient air temperature is close to 0 °C.

Dependences of displacements of separate railway track construction layers (ballast, sub-ballast, embankment and natural soil layers) were also received during numerical modelling (Fig. S.3.2.). Dependences of displacements of separate railway track construction layers on temperature using different sub-ballast thickness reconfirm the previously received results (Fig. S.3.1.) – the maximum vertical railway track construction displacements are observed at the temperature of 0 °C in railway track construction layers.

Dependences of maximum displacements on temperature in layers were numerically modelled at the step of 5 °C, thus regression equations were formulated using the received results (Fig. S.3.1.) in order to determine dependences of railway track construction

stiffness coefficients on layer temperature at the step of less than 5 °C, which were received according to the model introduced in Chapter 2.

Regression equations were formulated by splitting the temperature range into three sections: the first section covers the range from minus 30 °C to plus 5 °C, the second sections ranges from minus 5 °C to plus 5 °C and the third one covers from plus 5 °C to plus 30 °C. These equations will further be used to determine the dependence of the stiffness coefficient of separate railway track construction layers on temperatures in the layers. Also these dependences allow determining values of the maximum vertical displacements in temperature ranges where numerical modelling was not carried out. Values of correlation coefficients of these equations equal to 1 or close to this value show that the received equations are reliable and may be used for design and other numerical modelling works.

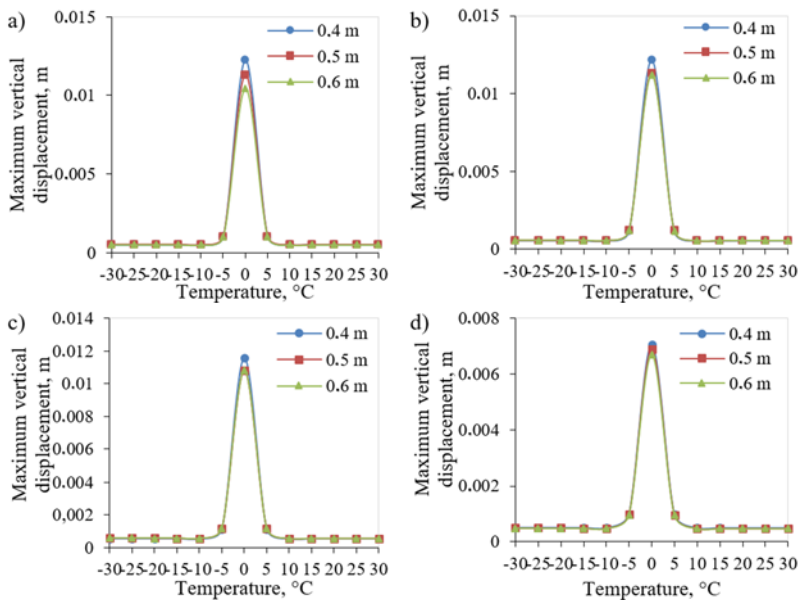


Fig. S.3.2. Maximum vertical displacements of different layers of the railway track construction when different thicknesses of sub-ballast (KG1) were used: a) ballast layer; b) sub-ballast layer; c) subgrade layer; d) natural ground layer

Having used the results presented in Fig. S.3.1 and adapted the model designated for calculating the stiffness coefficient, where $F_{kvazi} = q_a + 0.75 q_a + 2 + 0.5 q_a + 2 + 0.25 q_a + 2 = 900 \text{ kN}$ ($q_a = 225 \text{ kN}$), the received GKK stiffness coefficient (K) dependences on temperature are presented in Fig. S.3.3.

The received stiffness coefficient values were compared to the results of research carried out by other researchers (Fig. S.3.3.) which used the same or similar railway track construction under the exposure of loads created by rolling stock. According to the results of the research carried out by Lopez Pita et al. 2004, the stiffness coefficient for standard speed lines (up to 160 km/h) should be in zone 1 (50–60 kN/mm), and the desired stiffness

coefficient value for speed lines above 160 km/h should be in zone 2 (70–80 kN/mm). According to Gallego *et al.* (2011), the stiffness coefficient value should range from 70 kN/mm to 150 kN/mm. The research carried out by Li and Berggren 2010 determined railway track construction stiffness coefficient values for different railway track construction: 78 kN/mm – for normal railway track construction, 31.6 kN/mm – for soft railway track construction and 171.5 kN/mm – for very stiff railway track construction. Having applied the mathematical expressions received by Zakeri *et al.* (2016) for calculating railway track construction stiffness coefficients, taking into account the distance between sleepers and the load created by rolling stock, the optimal stiffness coefficient value should be 65 kN/mm.

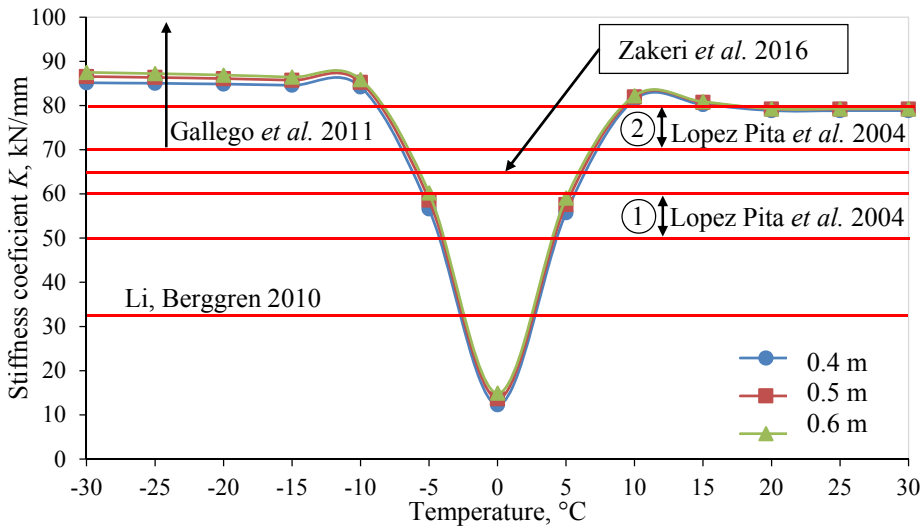


Fig. S.3.3. Stiffness coefficients of the whole railway track construction when different thicknesses of sub-ballast were used and changing ambient air temperature: 1 – Stiffness coefficients of railway track, then speed is lower than 160 km/h; 2 – Stiffness coefficients of railway track, then speed is greater than 160 km/h

Stiffness coefficient values of numerically modelled railway track construction with different sub-ballast thicknesses (0.4 m, 0.5 m and 0.6 m) that depend on quasistatic load created by rolling stock and the layer temperature confirm railway track construction stiffness coefficient values recommended by other authors, when railway track construction layer temperature is in the intervals from minus 30 °C to minus 2 °C and from plus 2 °C to plus 30 °C.

The received stiffness coefficient values in the layer temperature range between minus 2 °C and plus 2 °C are dissatisfactory and become critical. With railway track construction layer temperature being equal to 0 °C, when the thickness of railway track construction sub-ballast layer is 0.4 m, the stiffness coefficient is 12.3 kN / mm; the stiffness coefficient is 13.68 kN/mm when the thickness of the sub-ballast is 0.5 m and 14.92 kN/mm when the thickness of sub-ballast layer is 0.6 m, i. e. with railway track const-

ruction layers temperature approaching 0 °C from plus/minus 2 °C, the stiffness coefficient may decrease by about 20 kN/mm and become up to 38% lower than the desired value. This reduction may occur only when inappropriate thickness of sub-ballast layer is chosen or when sub-ballast layer does not carry out its protective functions for the embankment layer and allows the embankment layer to reach 0 °C.

General conclusions

1. Having carried out the analysis of research works and analysed the methodologies and numerical models used by other researchers, ballast and sub-ballast layers were determined to be the weakest components of railway track construction. These layers formed of loose materials determine uneven distribution of rolling stock loads on railway track construction. Numerical modelling and experimental research results showed that the quality of materials of railway track construction layers, layer installation technology, fine particle pollution caused in the course of wear and tear of materials forming the layers and ambient air temperature as well as water/moisture content in the layers are the factors that reduce the lifespan of railway track construction the most.
2. Having carried out the analysis of physical and mechanical properties of granite rubble for ballast layer and mineral aggregate mixture (KG1) for sub-ballast layer in different stages of the technological process, variation of these properties was observed, which was assessed in quantity terms using mathematical statistics methods. The use of the maximum standard deviation of complete pour-out through sieves, the size of the granules of which normally is of the size which constitutes 50–70% of mixture mass in the mixture, obtained from the regression equation was proposed for assessing the distribution of gradation. This maximum standard deviation value allows comparing loose materials of different size and irregularity (homogeneity). The original method allows assessing the scope of variation of gradation composition of any loose mixture in different production, transportation, storage and technological building process stages in a single figure (the maximum standard deviation).
3. Virtual models of different railway track construction profiles used and to be used in normative design documents of the Republic of Lithuania in “SV HEAT” software package environment, which allow assessing adverse effects of climate and materials used to install railway track construction on railway track construction hydrothermal modes, were created. The virtual models allow assessing the impact of the ambient air factors on physical processes occurring in railway track construction more accurately, thus cold indicator maps are no longer needed.
4. Hydrothermal modes of different railway track construction cross profiles used and to be used in the Republic of Lithuania at the coldest periods of 2013–2015 and the past 50 years were determined according to Slovak experience. In presence of the thickest snow cover (of 0.05 m), the frost depth differed by about 0.015 m comparing the same structure with and without snow cover. During numerical modelling of the cold period, the greatest difference (1.2 °C) was received on ballast layer surface on the 24th day, the difference in the middle of ballast layer was 1 °C, while at the boundary of ballast layer and PBS it was 0.6 °C. The lower is the ambient air temperature, the lower is the impact of ballast layer snow cover on all the layers of the railway track.

5. The model was implemented in ANSYS programme for comprehensive assessment of ambient air temperature and loads created by rolling stocks, taking into consideration the properties of structural materials, air and water content in railway track construction layers and adapting the dynamic conversion of the rolling stock force to quasistatic force eliminating inaccuracies of the assessment of dynamic models (dynamic force) – uneven indicators of railway track components (tracks, sleepers and pads) and mechanical, physical, contact zone and form indicators of the rolling stock that affect the maximum vertical displacements.
6. The received stiffness coefficient values of numerically modelled railway track construction that depend on the load created by the rolling stock and railway track construction layer temperature ranging from minus 30 °C to minus 4 °C and from plus 4 °C to plus 30 °C confirm the recommended GKK stiffness coefficient values received in research carried out by other authors. The received stiffness coefficient values of railway track construction layer temperatures from minus 4 °C to plus 4 °C do not correspond to the values received by other researchers and become critical. When the layer temperature is 0 °C and railway track construction PBS thickness is 0.4 m, the stiffness coefficient is 12.3 kN/mm, when PBS thickness is 0.5 m, the stiffness coefficient is 13.68 kN/mm and it is 14.92 kN/mm when PBS is 0.6 m-thick, i. e. with ambient air temperature approaching 0 °C from plus/ minus 4 °C, the stiffness coefficient may become up to 72% lower than its permitted level. Comprehensive adverse effect of the rolling stock and ambient factors would be reduced having accurately assessed the railway track construction frost depth. This assessment would allow choosing railway track construction structural materials and sub-ballast layer thickness more accurately, allowing to reduce railway track construction frost depth, which would in turn lead to critically reduced railway track construction stiffness coefficient.

Priedai³

A priedas. Balasto skaldos, geotekstilės ir geotinklo pagrindiniai rodikliai ir jų nustatymo standartinius metodus reglamentuojantys standartai

B priedas. Balasto sluoksnio ėminių, paimtų iš skirtingų technologinio proceso vietų, atitikimas normaliojo skirstinio reikalavimams

C priedas. Temperatūrų pasiskirstymai skirtingose skersinių profilių GKK, veikiant Lietuvos AOT

D priedas. Būtinasis mažiausias ėminių skaičius, granito skaldos savybėms nustatyti

E priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija

F priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

G priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Deividas NAVIKAS

GELEŽINKELIO KELIO BALASTO IR POBALASTINIO
SLUOKSNIŲ STRUKTŪROS IR SAVYBIŲ KAITOS
MODELIAVIMAS, ĮVERTINANT APLINKOS ORO
VEIKSNIUS IR TRAUKINIŲ EISMO APKROVAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Transporto inžinerija (03T)

MODELLING OF RAILWAY BALLAST AND
SUB-BALLAST LAYERS STRUCTURE AND
PROPERTIES CONSIDERING AMBIENT AIR
FACTORS AND TRAIN TRAFFIC LOAD

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Transport Engineering (03T)

2018 05 04. 13,25 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „BMK leidykla“
J. Jasinskio g. 16, 01112 Vilnius